

DISSERTATION
zur Erlangung des akademischen Grades Doctor rerum
naturalium (Dr. rer. nat.)

Die Verbesserung der Lehramtsausbildung in der Quantentheorie

Konzeption und Evaluation eines fachdidaktischen Seminars

Technische Universität Dresden

Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften

Institut für Fachdidaktik der Physik

Dresden, den 29. Januar 2019

Eingereicht von:	Matthias Schöne
geb. am:	11.07.1981
verteidigt am:	29.03.2018
1. Gutachter:	Prof. Dr. G. Pospiech
2. Gutachter:	Prof. Dr. R. Müller

Zusammenfassung

Bei der Ausbildung von Lehramtsstudenten stellt sich die Frage, ob die Vermittlung formal-theoretischer Kenntnisse in der Quantentheorie ausreicht, damit zukünftige Lehrer diese modern, interessant und praxisnah ihren Schülern vermitteln können. Es ist zu vermuten, dass fachdidaktische Kompetenzen, wie das Erkennen von Schülervorstellungen, Vermittlung fachspezifischer methodisch-didaktischer Kenntnisse und die Darstellung eines schüleradäquaten Zugangs ebenfalls zu einer soliden Ausbildung dazugehören.

Die vorliegende Arbeit untersucht, wie die Lehramtsausbildung in moderner Physik - speziell am Beispiel der Quantentheorie - durch eine adäquate Gestaltung der fachdidaktischen Anteile verbesserbar ist. Dabei werden sowohl theoretische Überlegungen im Modell der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion und die Befragung von Lehramtsstudenten und Dozenten einbezogen und aufbauend ein fachdidaktisches Zusatzseminar geplant und evaluiert.

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit wird dazu der lerntheoretische Rahmen der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion innerhalb des pädagogischen Konstruktivismus und der Conceptual Change-Theorie abgesteckt. Die Komponenten der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion werden dann für die Quantentheorie analysiert und in Verbindung mit den Untersuchungen der im nächsten Teil folgenden Anforderungsanalyse gebracht. Die große Stärke der Rekonstruktion ist die Möglichkeit, nicht nur Lernprozesse von der Schul- bis zur Hochschulebene zu analysieren, sondern diese auch strukturiert aufeinander aufbauend planen zu können. Es folgt abschließend die Darstellung des Forschungsstandes zum Professionswissen.

Der zweite Teil, die Anforderungsanalyse, beleuchtet die Einschätzung der Inhalte von Quantentheorievorlesungen, deren Ziele und erworbener Kompetenzen sowohl durch Lehramtsstudenten wie Dozenten. Hinzu kommen die Einschätzung geeigneter Schulinhalte und wichtiger quantenphysikalischer Konzepte als Bestandteile der didaktischen Rekonstruktion. Als entscheidender Punkt werden schließlich die Anforderungen an die fachdidaktische Ausbildung zu diesem Themengebiet analysiert.

Aus den beiden vorangegangenen Teilen kann im dritten Abschnitt ein Seminar zur Didaktik der Quantentheorie kompetenzorientiert geplant und im vierten Teil die Umsetzung hinsichtlich fachlicher und fachdidaktischer Kompetenzen, insbesondere die Änderung der kognitiven Struktur mit Hilfe von Concept Maps, sowohl quantitativ als auch qualitativ evaluiert werden.

Es zeigt sich, dass die Kombination von zunächst fachlicher Ausbildung mit einer fachdidaktischen Vertiefung des Themengebietes Quantentheorie Verbesserungspotential nicht nur für die fachdidaktische, sondern bemerkenswerterweise ebenfalls stark für die fachliche Kompetenz der Lehramtsstudenten bietet. Dabei zeigt sich außerdem die hohe Praktikabilität des Modells der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion nach LOHMANN (2006) und VAN DIJK und KATTMANN (2007) für die umfassende Planung universitärer Lehrangebote.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Forschungsidee	1
1.2. Forschungsziele	4
1.3. Aufbau der Arbeit	5
 I. Theoretische Grundlagen und Stand der Forschung	 7
2. Lerntheoretischer Rahmen	13
2.1. Der Pädagogische Konstruktivismus	13
2.2. Aneignung neuen Wissens durch Conceptual Change	19
2.3. Die Hochschuldidaktische Rekonstruktion	23
 3. Komponenten der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion zur Quantenphysik	 31
3.1. Fachliche Klärung	32
3.2. Schülervorstellungen	35
3.3. Ausgewählte Lernumgebungen auf Schulebene	37
3.3.1. Das Münchner Konzept	37
3.3.2. Das Frankfurter Konzept	38
3.3.3. Das Dirac-Konzept von Michelini	40
3.4. Vorstellung von Studenten zum Thema Quantenphysik	43
3.5. Beispiele für die hochschuldidaktische Strukturierung des Themas Quan- tenphysik	46
3.5.1. Milq – Münchener Internet-Projekt zur Lehrerfortbildung in Quan- tenmechanik	46
3.5.2. Das Diracmodell in der Lehramtsaus- und -fortbildung	47
3.5.3. Das Instruktionsmodell von Kalkanis	49
 4. Professionswissen von Lehramtsstudenten im Fach Physik	 53
4.1. Historische Entwicklung	53
4.2. Komponenten des Professionswissens von Lehrern	54
 5. Forschungsfragen und Hypothesen	 61

II. Anforderungsanalyse der Lehramtsausbildung	65
6. Studiendesign	69
6.1. Untersuchungsablauf und Stichprobe	69
6.2. Instrumente	70
6.3. Auswertemethoden und Gütekriterien	72
6.3.1. Qualitative und Quantitative Inhaltsanalyse	73
6.3.2. Clusteranalyse	75
7. Auswertung und Ergebnisse	81
7.1. Anforderungsanalyse Studenten	82
7.1.1. Wahrgenommene Vorlesungsinhalte	82
7.1.2. Studentische Selbsteinschätzung der Kompetenzen	88
7.1.3. Anforderungen an ein Zusatzseminar	90
7.1.4. Geeignete Schulinhalt	96
7.2. Anforderungsanalyse Dozenten	103
7.2.1. Themen und Ziele der Vorlesungen	103
7.2.2. Angestrebte Kompetenzen aus Dozentensicht	106
7.2.3. Wichtige Konzepte der Quantenphysik	111
8. Zusammenfassung und Diskussion	115
III. Konzeption Seminar zur Didaktik der Quantentheorie	119
9. Gestaltungseckpunkte für die Konzeption	123
9.1. Gestaltungseckpunkte aus der Theorie	123
9.2. Gestaltungseckpunkte aus der Anforderungsanalyse	128
10. Konzeption	131
10.1. Ziele der Lehrveranstaltung	131
10.2. Strukturierung des Seminars	132
10.3. Verbesserungsvorschläge der Teilnehmer des Pilotseminars	136
IV. Evaluation Seminar zur Didaktik der Quantenphysik	137
11. Studiendesign	141
11.1. Untersuchungsablauf und Stichprobe	141
11.2. Instrumente und Gütekriterien	143
11.2.1. Unterrichtsvignetten	143
11.2.2. Methoden zur Konstruktion des Leistungstestes und Gütekriterien	144

11.2.3. Concept Maps	155
11.3. Auswertemethoden	157
11.3.1. Methoden zum Vergleich von Mittelwerten	157
11.3.2. Lineare Regression und Korrelation	159
11.3.3. Analyse von Concept Maps	164
12. Auswertung und Ergebnisse	167
12.1. Kompetenztypen und Ergebnisse des Seminars	167
12.2. Relevanz und Lehrbarkeit quantenmechanischer Begriffe	178
12.3. Regressionsanalyse für die Änderung des fachlichen Wissens	181
12.4. Regressionsanalyse für die Änderung des fachdidaktischen Wissens	187
12.5. Auswertung der Concept Maps	192
13. Zusammenfassung und Diskussion	195
 V. Zusammenfassung und Implikationen	 197
14. Zusammenfassung der Ergebnisse	201
14.1. Theorie	201
14.2. Konzeption und Empirie	206
15. Implikation und Forschungsperspektiven	209
 Anhang	 213
16. Clusteranalyse Studenten Vorlesungsinhalte	215
17. Clusteranalyse Studenten Zusatzinhalte	219
18. Clusteranalyse Studenten Geeignete Schulinhalte	223
19. Clusteranalyse Dozenten	229
20. Clusteranalyse Kompetenztypen	233
21. Kompetenztypen	237
22. Zusammenhang zwischen der Änderung des Professionswissens und der Relevanz und Lehrbarkeit von Konzepten	239

23. Zusammenhang der Änderung von fachlichen und fachdidaktischem Wissen in der Versuchsgruppe	241
24. Gruppenvergleich der Ergebnisse des Professionswissentests	245
25. Vergleich der Ergebnisse des Prä- und Posttests Professionswissen	249
26. Lineares Zusammenhangsmodell zwischen fachlichen und fachdidaktischen Wissen	251
27. Regressionsmodelle fachlichen und fachdidaktischen Wissens	253
28. Verwendete Pakete und Optionen in R	257
29. Zeitplanung des fachdidaktischen Zusatzseminars	259
30. Arbeitsblätter des fachdidaktischen Zusatzseminars	261
31. Dozentenfragebogen	265
32. Studentenfragebogen	275
33. Fragebogen zur Evaluation des Seminars	285
34. Kategorisierung qualitativer Inhalte der Anforderungsanalyse	295
Literaturverzeichnis	301
Abbildungsverzeichnis	313
Tabellenverzeichnis	317
35. Danksagung	323
36. Erklärung zur wissenschaftlichen Arbeit	325

Abkürzungsverzeichnis

CA	cognitive apprenticeship	18
CK	content knowledge	71
CC	Conceptual Change	19
PCK	pedagogical content knowledge	15
FDW	Fachdidaktisches Wissen	57
PK	pedagogical knowledge	139
RSS	Residualquadratsumme	161
VIF	Varianzinflationsfaktor	161
IPN	Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik	23
ERTE	educational reconstruction for teacher education	
DBR	Design Based Research	27
FCI	Force concept inventory	17
IDIFO	Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento	127
milq	Münchener Internet-Projekt zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik	32
FCI	Forced Concept Inventory	17
EPR	Einstein-Podolsky-Rosen	40
EPA	Einheitlichen Prüfungsanforderungen für das Abitur	38
IBE	Interaktive Bildschirmexperimente	34
PISA	Programme for International Student Assessment	
TIMSS	Trends in International Mathematics and Science Study	
CM	Concept Maps	62
PCK-S	pedagogical content knowledge studies	26
NOS	nature of science, Natur der Naturwissenschaften	17
SPQR	Schülerprogramm zur Quantenreflexion	47
GHZ	Greenberger-Horne-Zeilinger	

1. Einleitung

1.1. Motivation und Forschungsidee

The development of quantum mechanics (QM) has not only suggested a radically new scientific viewpoint for the physical world, but has also formed the conceptual basis for the proper interpretation of a wide range of physical phenomena. (KARAKOSTAS und HADZIDAKI, 2005, S.607)

Die Quantentheorie hat eine enorme Bedeutung als eine der tragenden Säulen der Physik. Für die Naturphilosophie bietet sie die Möglichkeit, neu über die Begriffe wie Realität und Erkennbarkeit nachzudenken. Der Wirtschaft und Technik liefert sie viele moderne Anwendungsmöglichkeiten wie Laser und Halbleitertechnik. Daher stellt moderne Physik und vor allem die Quantentheorie einen wichtigen Bereich der physikalischen Allgemeinbildung in den Schulen dar. In der Quantenphysik als ein Grundpfeiler der Physik konnten in den letzten Jahrzehnten durch neue experimentelle Möglichkeiten fundamentale Konzepte zu Unbestimmtheit, Verschränkung und Quanteninformation überprüft werden. Diese haben nicht nur eine Bedeutung für die theoretische Modellbildung, sondern laden ein über philosophische Fragen zum Sein der Dinge und ihre Erkenntnismöglichkeiten nachzudenken. Leider haben die neuen Entwicklungen wenig Eingang in Lehrpläne und die Ausbildung von Lehrern gefunden. Der Unterricht an Gymnasien in Quantenphysik ist weiter stark von historischen Entwicklungen und Atommodellen geprägt. Schüler sollten jedoch nicht nur jahrhundertealte Physik kennen lernen, sondern auch faszinierende Entdeckungen und Entwicklungen moderner Physik, allen voran die Quantenphysik in ihrer Tragweite. Es ist die Aufgabe des Lehrers eine Brücke zwischen der modernen Physik und den Schülern zu bauen.

Für die Lehramtsausbildung sieht GRAMZOW et al. (2011) das schlechte Abschneiden deutscher Schüler bei PISA und TIMSS als allgemeines Problem. Beide üben eine deutliche Kritik am deutschen Bildungssystem, vor allem an der Mathematik und den Naturwissenschaften. Außerdem stellt WOITKOWSKI et al. (2012) fest: „Vor diesem Hintergrund erscheint es problematisch, dass die Vermittlung von Fachwissen an deutschen Hochschulen [...] wesentliche Schwächen aufweist: Die heterogenen Lernvoraussetzungen, die die Studierenden aus der Schule an die Hochschule mitbringen, können dort nicht ausgeglichen werden. [...] Mehrere Studien stellen bei Lehrpersonen dieselben fachlich konzeptuellen

Fehlvorstellungen fest, wie sie von Schülern bekannt sind.“ Gefordert wird daher eine Veränderung des Schulsystems, aber vor allem auch der Lehrerbildung. Die empirische Datenlage ist noch gering, aber es gibt bereits vielversprechende Ansätze für die Fortentwicklung (RIESE, 2009). Für die Quantenphysik bedeutet dies, dass ein Kanon von Konzepten sowohl für die Universitäten als auch Schulen und dazu geeignete Vermittlungswege entwickelt werden muss (Siehe hierzu beispielsweise POSPIECH und SCHÖNE, 2014). Erste Beiträge im schulischen Bereich liefern neue Auflagen von Lehrwerken wie (GREHN und KRAUSE, 2007; BADER und DORN, 2010), welche versuchen die Schülerprobleme mit der modernen Physik, speziell der Quantenphysik, zu lösen.

Was für Probleme haben Schüler?

Wie die Studie von LICHTFELDT (1992) zeigt, sind quantenphysikalische Begriffe zum einen für Schüler sehr unanschaulich und wenig intuitiv, ihre Alltagsferne erschwert eine Analogiebildung, die das Lernen unterstützen könnte. Hinzu kommt, dass Schüler in der klassischen Physik vorgebildet sind und auch im neuen Weltmodell der Quantenmechanik in den vorangegangenen klassischen Realismus zurückfallen und ein notwendiger Konzeptwechsel und ein konzeptionelles Verständnis der fachlichen Inhalte nicht stattfindet. Dies zeigt sich in der Verwendung eines klassischen Bahnbegriffes, wie im Bohrschen Atommodell, der Vorstellung der Teilchen als winzige Kügelchen oder allgemeiner in der Lokalisierung von Quantenobjekten (FALK, 2007). Weiterhin ist die Quantentheorie mathematisch überaus anspruchsvoll. Ihr mathematischer Apparat, dessen Beherrschung tiefer gehende Kenntnisse der Funktionalanalysis benötigt, steht Schülern nicht zur Verfügung. Es existieren vielfältige Ausarbeitungen von Quantenphysiklehrgängen, die diese Probleme lösen möchten. Eine stammt von *Küblbeck* (kurz in KIRCHER et al., 2009, Seite 455ff), der die Grundprinzipien anhand eines einheitlichen Modells mit Hilfe des Doppelspalt-experimentes und expliziter Diskussion der Modellbildung erläutern will. Das *Münchner Modell* (WIESNER, 2008) stellt die Begriffsbildung in den Vordergrund, konzentriert sich auf vier wesentliche Züge der Quantenmechanik und behandelt ebenfalls ausführlich die Modellbildung, insbesondere die Präparation und Interpretationsmöglichkeiten. Photon und Elektron werden innerhalb eines Spiralcurriculums gleichberechtigt behandelt. Das Münchner Konzept wird in der vorliegenden Arbeit als Anknüpfungspunkt zwischen Schule und Hochschule dienen, da es nicht nur ein Modell für die Behandlung der Quantenphysik in der Schule darstellt, sondern gleichzeitig auch ein Weiterbildungskonzept für im Beruf stehende Lehrer ist.

Das *Frankfurter Modell* nach (POSPIECH, 2004) und ähnlich auch bei (MICHELINI et al., 2000) bedienen sich der Optik als Grundlage. Es werden qualitative Erklärungen über Spinzustände mit Hilfe von Polarisatoren dargestellt. Außerdem gibt es vorbereitende Analog-Experimente zum Verlust klassischer Eigenschaften, Grundbegriffe der Quantenphysik werden ausführlich eingeführt und deren philosophische Aspekte diskutiert. Eine technologische Perspektive und eine Anknüpfung an die Atomphysik schließen sich an. Interessante Konzepte zur Behandlung moderner Quantenphysik sind also gegeben, nun

ist eine Umsetzung dieser theoretischen Erkenntnisse in den praktischen Schulunterricht nötig. Die Basis für einen solchen gelungenen Unterricht in moderner Physik stellen Physiklehrer dar, die zum einen fachlich die quantenphysikalischen Grundlagen kennen und zum anderen Wissen über geeignete Methoden besitzen, um diese Grundlagen und ihre Interpretation dem Schüler zu vermitteln. Dabei fungieren Lehrer als Bindeglied. So konnte beispielsweise DARLING-HAMMOND (2006) zeigen, dass effektive Lehrer einer der wichtigsten Faktoren für das Lernen von Schülern ist. Auch neuere Studien und Meta-studien (siehe HATTIE, 2009) zeigen die enorme Bedeutung des Lehrerhandelns für den Unterricht. Die Vermittlungskompetenz umfasst auch fachdidaktische Modelle, wie die Didaktische Rekonstruktion. Sie dient als theoretischer Rahmen für die fachliche Klärung, die Erfassung der Lernerperspektive, insbesondere der Schülervorstellungen, und die sich aus diesen Analysen ergebende didaktische Strukturierung (KATTMANN et al., 1997). Sie ist somit sowohl für die Analyse als auch die Planung von naturwissenschaftlichen Unterricht geeignet.

Der theoretische Apparat der Quantenphysik steht Lehramtsstudenten in den Grundlagen zwar zur Verfügung, es fehlt aber oft ein konzeptionelles Verständnis für die Quantenphysik als notwendiges Grundgerüst für die eigene Lehrtätigkeit, wie Studien von ROBERTSON und KOHNLE (2010) und WITTMANN et al. (2005) sowie in Deutschland von MÜLLER und WIESNER (2000) zeigen. Aber selbst gute Physikstudenten an Elite-Universitäten zeigen nur ein oberflächliches und fragmentarisches Konzeptverständnis, so stellen JOHNSTON et al. (1998) über diese fest: „The results suggest that the mental models used by these students are technically advanced but structurally unsophisticated.“ Oft fehlt Studenten das konzeptionelle Verständnis über den theoretischen Aufbau der Quantenphysik, so dass die dazugehörigen Übungen zu einem Rechnen ohne mentales Konzept verkommen. Interpretationsfragen werden nicht ausreichend in den untersuchten Vorlesungen geklärt. Bei einem Großteil der Studenten findet kein Wechsel von der klassischen Mechanik zur Quantenphysik statt, eine klassische Perspektive wird beibehalten. Das Bohrsche Atommodell wird beispielsweise nicht in Frage gestellt, sondern es wird vielmehr als willkommene einfache Erklärung herangezogen. Quantenobjekte werden fälschlicherweise als permanent lokalisiert angesehen, häufig wird ein Bahnbegriff genutzt. MÜLLER und WIESNER (2000) kommen zu der Feststellung: „Sehr oft wird explizit auf in der Schule erworbenes ‚Wissen‘ zurückgegriffen. Die Ausbildung der Lehramtsstudenten in der Universität scheint also nicht ausreichend zu sein, um ein angemessenes quantenmechanisches Bild des Atoms zu vermitteln, mit dem begründete didaktische Entscheidungen gefällt werden können“. Laut MÜLLER und WIESNER (1997) stützen sich die Lehrer in ihrer Ausbildung auf eigene Erfahrungen, eigene Überzeugungen über gute Physiklehre, Unterricht an Universitäten und Vorgaben durch den Lehrplan.

Eine mögliche Ursache sind ungeeignete Lehrmedien für die Lehramtsausbildung, so stellt MCKAGAN et al. (2010) fest: „[...] most textbooks included little or no discussion of the issues most frequently raised in the physics education research literature on quan-

tum mechanics. For example, most textbooks do not discuss whether particles move in sinusoidal paths, whether energy is lost in tunneling, or how to determine the qualitative shape of a wave function from a potential.“ Zudem findet laut MCKAGAN et al. (2010) *keine* Diskussion des quantenmechanischen Messprozesses in den untersuchten modernen Lehrbüchern statt. Analoge Probleme sind ebenfalls für den Aufbau der Vorlesungen selbst zu vermuten. Es ist u. a. ein Anliegen dieser Arbeit, dies aufzuklären.

Die Probleme führen zu der Annahme, dass die heutige Ausbildung in der Quantenphysik deutlich verbessert werden kann und muss. Neben den dargestellten fachlichen Defiziten, gibt es auch schwerwiegende Lücken im fachdidaktischen Wissen. Laut einer DPG-Studie aus dem Jahre 2006 (GROSSMANN und URBAN) wird in der Lehramtsausbildung teilweise zu viel Wert auf das fachliche bei Vernachlässigung des fachdidaktischen Wissens gelegt. Das Lehramtsstudium folgt in Teilen der Ausbildung der Fachphysiker. Die Vorlesungen werden auf Grund der Zeitbeschränkung, die sich aus der Teilung des Lehramtsstudienganges in zwei Hauptfächer plus fachdidaktischer und erziehungswissenschaftlicher Ausbildung ergeben, oft gekürzt. In der genannten Studie wird daher eine Abkehr vom traditionellen Vorgehen der strengen fachlichen Aufspaltung in Teilbereiche gefordert. Sie sollte im Lehramtsstudium vermieden werden und die fachdidaktische und methodische Ausbildung ein stärkeres Gewicht erhalten. Das Lehramt sollte nach Ansicht der Autoren eine ganz eigenständige Profession und kein verkürztes Fachstudium sein.

Diese Dissertation möchte Probleme in der Ausbildung von Lehrern in Moderner Physik aufzeigen und konkrete Verbesserungsvorschläge für den universitären Teil der Lehramtsausbildung geben.

1.2. Forschungsziele

Die in den Studien gezeigten Mängel im Professionswissen von Lehramtsstudenten ergeben für diese Arbeit die grundsätzliche Forschungsfrage:

Wie kann die Ausbildung der Lehramtsstudenten in der Quantenphysik verbessert werden?

Diese Hauptfrage lässt sich in die vier Teilfragen aufgliedern:

- F1** Welche Anforderungen stellen Studenten und Dozenten an eine umfassende quantenphysikalische Ausbildung, welche sowohl Kompetenzen hinsichtlich eines breiten fachlichen Verständnisses der Quantenmechanik, als auch fachdidaktische Komponenten, wie die Elementarisierung quantenphysikalischer Inhalte, adäquates Reagieren auf Schülervorstellungen und Konzeption geeigneter Lernumgebungen einschließt?
- F2** Wie stellt sich das fachliche und fachdidaktische Wissen der Studenten am Ende der theoretischen Ausbildung dar?
Welche Unterschiede gibt es beim Wissen der Studenten

Wie können vorhandene Lücken durch ein Seminar geschlossen werden?

F3 Wie ist ein die Theorie ergänzendes fachdidaktisches Seminar zur Quantenphysik zu planen, dass sowohl Anforderungen von Dozenten und Studenten, als auch die gemessenen Kompetenzen der Studenten nach der Theorieausbildung berücksichtigt? Wie lässt sich die didaktischen Rekonstruktion im erweiterten Modell nach LOHMANN (2006, S.66) und VAN DIJK und KATTMANN (2007) im Seminar selbst realisieren?

F4 Erhöht ein so geplantes, ergänzendes Seminar die fachlichen und fachdidaktischen Kompetenzen der Studenten?

Lässt sich eine Erweiterung ihres konzeptionellen Verständnisses feststellen?

Aus diesen grundsätzlichen Forschungsfragen werden im Theorieteil, Kapitel 5 (S.61) der Arbeit jeweils operationalisierte und testbare Hypothesen abgeleitet.

1.3. Aufbau der Arbeit

Um die Probleme in der Ausbildung von Lehrern in moderner Physik lösen zu können, müssen Theorie, Konzeption und Empirie, wie in der Abbildung 1.1 zu sehen, Hand in Hand gehen. Nach Klärung der Grundlagen des lerntheoretischen Rahmens, der Komponenten des Professionswissens und vorhandener Ausbildungskonzepte für die Quantenphysik als Perspektive der Fachdidaktik im ersten Teil folgt als empirische Analyse die bedarfsorientierte Klärung der Anforderungen an die Lehramtsausbildung als Differenz von Ist- und Sollzustand im Teil 2. Dafür werden sowohl Dozenten der theoretischen Physik als auch Lehramtsstudenten aus Deutschland schriftlich mit Hilfe von Fragebögen, die sowohl offene als auch geschlossene Elemente enthalten, befragt. Die Perspektive der Lehrpersonen aus der Theorie umfasst neben Vorlesungsinhalten, vermittelten Kompetenzen und Zielen der Vorlesungen vor allem die Frage nach den wesentlichen quantenphysikalischen Konzepten, Bewertung der studentischen Vorkenntnisse und Hindernisse für eine erfolgreiche Ausbildung. Für die Perspektive der Lehramtsstudenten werden ebenfalls die wesentlichen Inhalte und die vermittelten Kompetenzen erfasst, sie enthält zusätzlich die Frage nach gewünschten fachlichen und fachdidaktischen Inhalten für das geplante Seminar, geeignete Schulthemen und eine Selbsteinschätzung des eigenen Professionswissens. Diese Anforderungen werden bei der Konzeption einer Unterrichtseinheit zur Fachdidaktik der Quantenphysik mit Hilfe der didaktischen Rekonstruktion im dritten Teil berücksichtigt. Es schließt sich die Evaluation dieser Unterrichtseinheit im Prä-/Post-Design im Teil 4 an. Dabei werden Komponenten des Professionswissens durch offene und geschlossene Fragen, sowie die Vernetzung von Inhalten und Konzepten durch Concept Maps vor und nach dem Seminar getestet und mit einer Kontrollgruppe verglichen. Daneben werden Problemtypen bezüglich des lehramtsspezifischen Professionswissens identifiziert. Schließlich können diese Ergebnisse mit den Zielen der Lehrveranstaltung verglichen werden. Es folgt zum Schluss

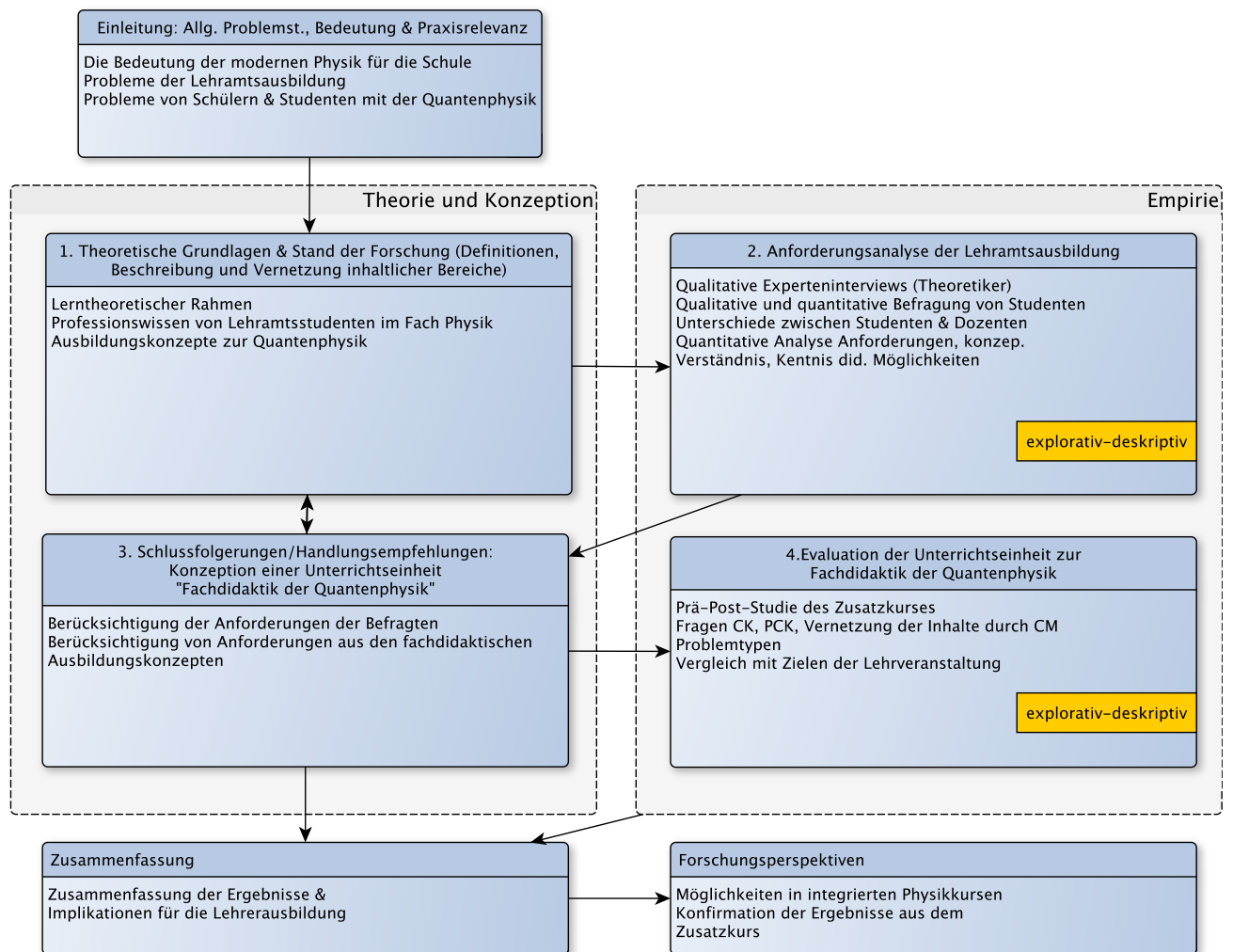
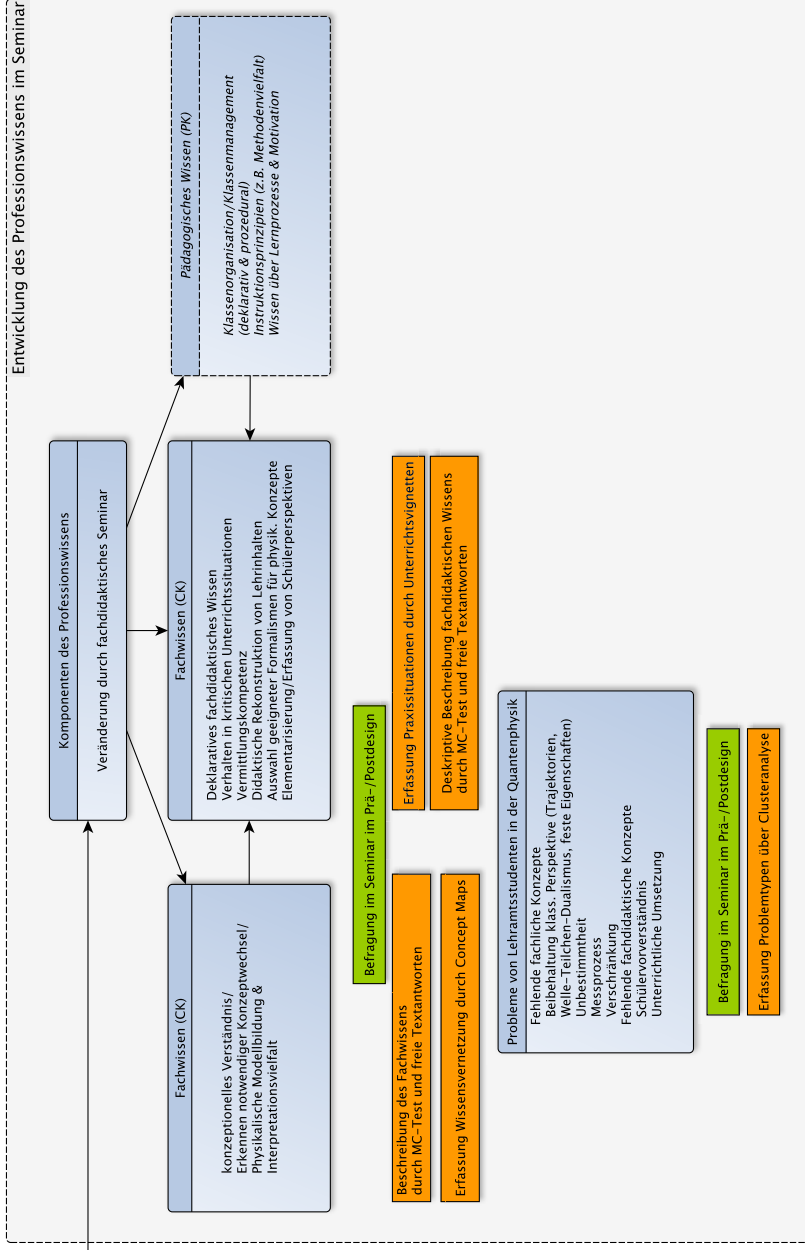
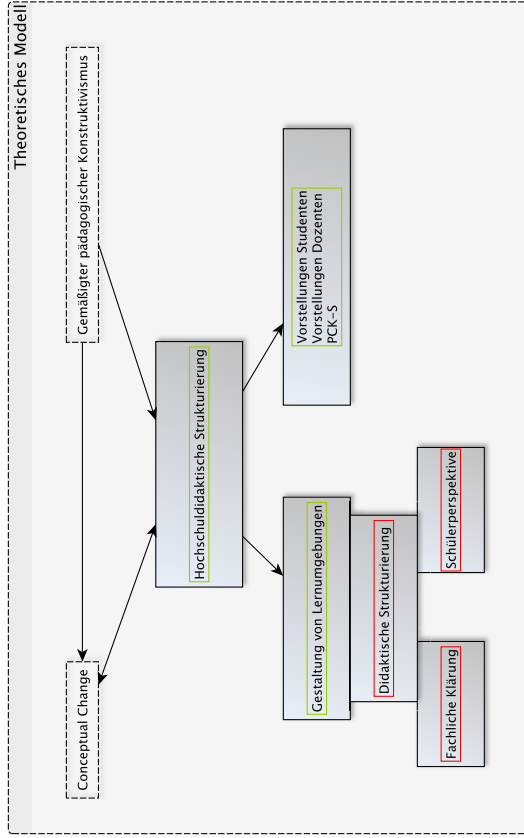
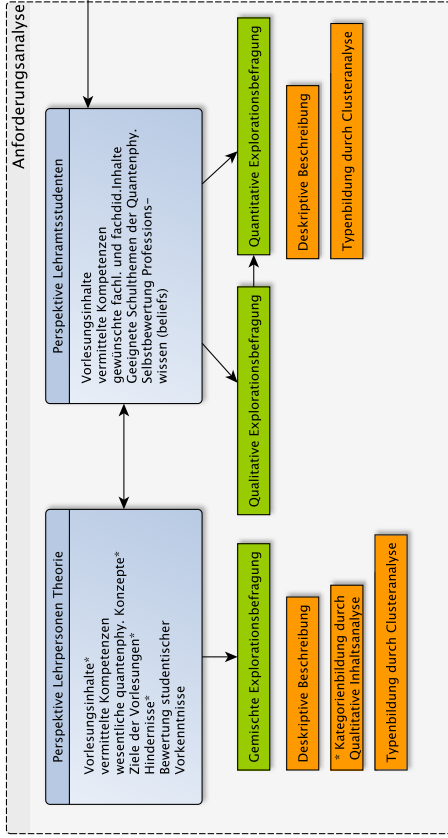


Abbildung 1.1.: Aufbau der Arbeit

eine Zusammenfassung mit Implikationen für die Lehramtsausbildung und der Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf.

Teil I.

Theoretische Grundlagen und Stand der Forschung



Die vorhergehende Abbildung zeigt das Forschungsdesign der Dissertation. Es enthält neben dem theoretischen Modell die zwei wesentlichen Analysen dieser Arbeit, zum einen die Ermittlung der Anforderungen an die fachdidaktische Ausbildung, um das ergänzende fachdidaktische Seminar planen zu können und zum anderen die Analyse der Wirksamkeit dieses Seminars. Die grauen Kästen sind die für die Analyse notwendigen theoretischen Konstrukte, die in dieser Arbeit zu untersuchenden Inhalte sind graublau dargestellt, grün sind die zugehörigen Methoden der Datengewinnung und orange die darauf aufbauenden Methoden der Datenauswertung.

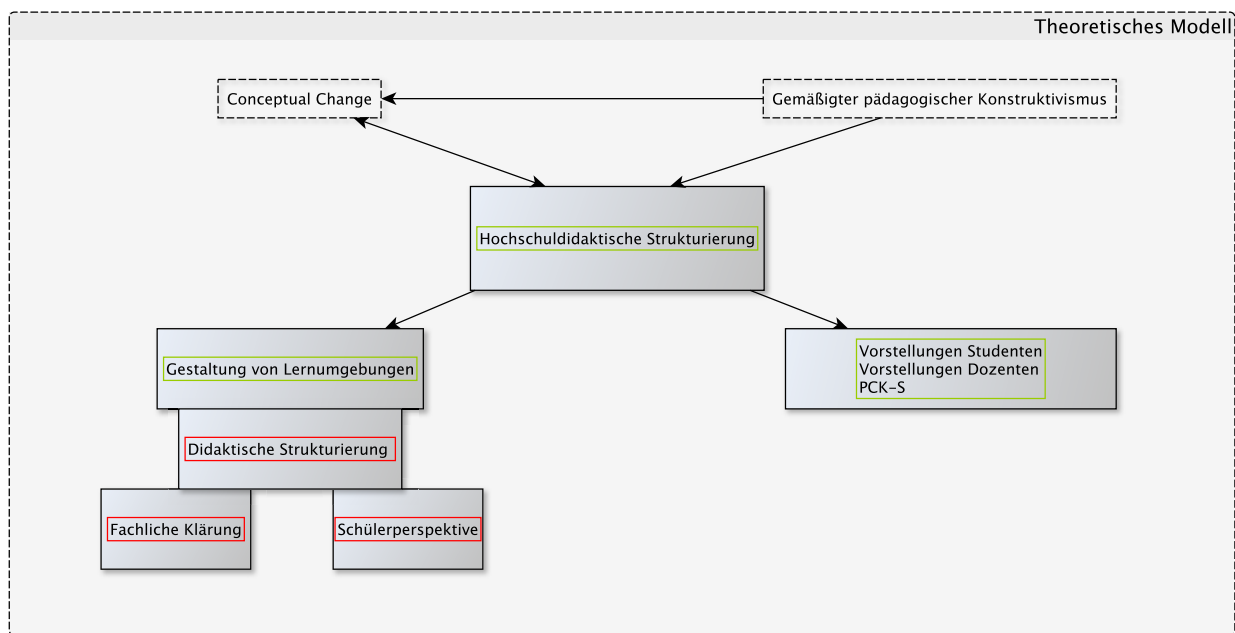


Abbildung 1.2.: **Theoretisches Modell**

grün: Hochschuldidaktische Rekonstruktion

rot: Didaktische Rekonstruktion auf Schulniveau

Die in Abb.1.2 gezeigte theoretischen Basis bildet das modifizierte Modell der Didaktischen Rekonstruktion für die Hochschulausbildung, in Anlehnung sowohl an VAN DIJK und KATTMANN (2007) als auch LOHMANN (2006). Dieses fußt auf dem gemäßigten pädagogische Konstruktivismus und der damit eng verbundenen Theorie des Conceptual Change, welche am Anfang des Kapitels vorgestellt werden sollen. Die Didaktische Rekonstruktion besteht aus zwei aufeinander aufbauenden Teilen:

Zum einen die hochschuldidaktischen Komponenten, welche in Abb.1.2 grün umrandet sind, und aus der Gestaltung einer schulischen Lernumgebung, den Studien über das fachdidaktische Wissen von Lehramtsstudenten PCK-S und Vorstellungen über die geeignete Hochschulausbildung aus Studenten- und Dozentsicht und schließlich aus der konkreten

Ausgestaltung einer akademischen Lernumgebung für das Lehramt bestehen.

Zum anderen die klassische Didaktische Rekonstruktion zur Gestaltung von Lernumgebung im Schulbereich, welche aus der fachlichen Klärung, der Erfassung der Schülerperspektive und der sich aus diesen beiden Teilen ergebenden didaktische Strukturierung, welche der ausgestalteten Lernumgebung im hochschuldidaktischen Modell entspricht.

Die Didaktische Rekonstruktion wird innerhalb dieser Arbeit zweifach angewendet:

1. Das klassische Modell ist für die Studenten im fachdidaktischen Seminar zur Quantenphysik zur Analyse von Schülervorstellung und zur Planung eines eigenen Unterrichtsganges und einzelner Schulstunden einzusetzen.
2. Das hochschuldidaktische Modell wird benutzt, um das Seminar zu konzipieren. Die Hochschuldidaktische Rekonstruktion dient dabei als Analysewerkzeug für die verschiedenen Ausbildungskonzepte zur Quantenphysik und hilft die Schwerpunkte des zu konzipierenden Seminars festzulegen.

Nach den lerntheoretischen Grundlagen werden die für diese Arbeit wichtigen einzelnen Komponenten der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion im Abschnitt 3 vorgestellt. Es folgen dann die für die Evaluation wichtigen Aspekte des lehramtsspezifischen Professionswissen im Abschnitt 4. Der Theorieteil schließt mit den sich aus der Theorie ergebenden Forschungsfragen.

2. Lerntheoretischer Rahmen

Das in dieser Arbeit angewendete Analyse- und Planungswerkzeug der Didaktischen Rekonstruktion besitzt den pädagogischen-lernpsychologischen Konstruktivismus als Grundlage. Dieser soll im nächsten Abschnitt vorgestellt und vom erkenntnistheoretischen Konstruktivismus differenziert werden. Eng damit zusammen hängt die Theorie des Konzeptwechsels als wichtige Komponente des physikdidaktischen Wissens. Als wesentliche Komponente des lerntheoretischen Rahmens folgt dann die Darstellung zweier Modelle der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion.

2.1. Der Pädagogische Konstruktivismus

Wisdom cannot be told (BRANSFORD, 1993)

Unter Konstruktivismus sind mehrere philosophische Strömungen des 20. Jahrhunderts zu verstehen, deren Ideen aber schon älteren Ursprungs sind. So geht bereits auf Immanuel Kant folgendes Zitat zurück: „Ein Mensch könne die Dinge niemals erkennen, wie sie ‚an sich‘ sind, sondern nur, wie sie ‚für ihn‘ seien.“ (zitiert nach MIETZEL, 2007, S.45)

Nach dem radikalen Konstruktivismus, vertreten beispielsweise durch GLASERSFELD (2008), zeigt jeder Mensch jeweils ein vollkommen eigenes Verständnis der Welt. Eine Beurteilung des Grades dieses Verständnisses durch andere Personen ist nicht möglich, die reale Welt an sich wird aber nicht wie im Solipsismus¹ in Frage gestellt. Nach (SIEBERT, 1999) argumentiert der Solipsismus im Vergleich zum Konstruktivismus ontologisch, statt epistemologisch, dass es kein eindeutiges Wissen von dieser Welt geben kann. Es herrscht dabei eine Gleichberechtigung des Wissens, dass „ein einzelner Lernender jeweils ein Wissen konstruieren kann, dass keiner Überprüfung und Bestätigung durch andere bedarf, grundsätzlich auch gar nicht zu überprüfen ist [...]“. Im Hinblick auf eine Lerntheorie ist dieses philosophische Fundament allerdings pädagogisch unhaltbar. So wäre es nicht statthaft, ungünstige Schülervorstellung zu korrigieren, da diese z.B. den Vorstellungen eines langjährigen Wissenschaftlers gleichgestellt wären. Nach SIEBERT (1999) entsteht im radikalen Konstruktivismus emergentes Verständnis nur innerhalb kognitiver Netzwerke und kann nicht extern vermittelt werden. Jedes praktische Wissen ist eine vorläufige

¹ Nur das Selbst existiert, alles existiert in der Vorstellung des Selbst.

Zwischenlösung, welches als Interimswissen immer weiter ausdifferenziert wird. Diese werden bei Siebert Lernchreoden genannt und sind biografisch geprägte Lernzugänge und Annahmen über eigene Möglichkeiten und Interessen.

Im gemäßigten Konstruktivismus hingegen wird angenommen, dass sich Menschen gegenseitig bei der Wissenskonstruktion beeinflussen können. Ein Lehrer kann beispielsweise auf seine Schüler einwirken, um „auf deren kognitiven Prozesse Einfluss zu nehmen.“ In dieser Variante der Theorie wird zwar auch das selbstständig initiierte und überwachte Lernen als Ideal angesehen, Lernen sei aber auch extern motiviert. JENKINS (2000, S.602) betont die Wichtigkeit des Experten in dieser Form eines sozialen Konstruktivismus: „Science evolved very late in human history and it seems more than optimistic to assume that young students can construct scientific explanations simply by observing phenomena and generating and testing hypotheses. Even if this were possible, the question would remain of whether engaging students in the necessary practical activities is the most efficient way of promoting their learning.“

Der epistemologische Konstruktivismus als wissenschaftstheoretisches Konstrukt ist kein notwendiges Fundament einer konstruktivistisch orientierten Lernpsychologie, da diese auch durch den epistemologischen Realismus fundiert sein könnte. Die Untersuchungsgegenstände von Erkenntnistheorien sind die Möglichkeiten des Menschen Wissen zu erlangen, speziell beim lernpsychologische Konstruktivismus kognitive Konstruktionsprozesse. Die Annahme einer realen Empirieebene und Relation zwischen dieser und kognitiven Modellen im Realismus sind kein Widerspruch zur Konstruktion von Wahrnehmungsprozessen. Daher ist der Vorwurf durch JENKINS (2000, S.601), dass der Konstruktivismus „[...] lead in any logical way to a rejection of the world as an external reality“, genauso wie die Behauptung, der pädagogische Konstruktivismus möchte jeden zum professionellen Naturwissenschaftler machen, haltlos. Natürlich kann nicht alles in der Naturwissenschaft nachempfunden werden, exemplarisches Üben der naturwissenschaftlichen Methoden ist trotzdem pädagogisch möglich und sinnvoll.

Der lernpsychologische Konstruktivismus nimmt an, dass Lernen individuelle Konstruktions- und Repräsentationsprozesse der Welt sind. Das Lernen hängt stark vom Lernenden und seiner Erfahrung, in naturwissenschaftlicher Hinsicht von seinen (Prä-)Konzepten ab, wird aber auch durch soziale Interaktion beeinflusst (Duit in DUIT, 1991, S.68ff). Duit sieht das Lernen als „active interaction of key cognitive processes, such as perception, imagery, organization, and elaboration.“

SIEBERT (1999) identifiziert als Ausgangspunkt für das konstruktivistische Lernen eine Störung bekannter Grundsätze und Konzepte (Perturbation). Diese kognitive Dissonanz ist notwendig für Lernvorgänge, der klassische Wahrheitsbegriff wird dabei aber durch den Begriff der *Viabilität* ersetzt, d.h. es werden Konzepte gebraucht, die sich in der Welt als überlebensfähig und brauchbar erwiesen haben. Der ontologische Anspruch an Wahrheit dieser Konzepte ist für den Konstruktivisten pragmatisch irrelevant. Konstruktivistisch ist das Lernen rekursiv, es baut auf bereits Gelerntem auf; was erkannt werden kann, hängt

davon ab, was bereits erkannt wurde. Diese Strukturdeterminiertheit drückt sich in der selbstreferenziellen Bewertung der Interessantheit aus. Sie erfolgt in Relation zum eigenen Wissen, das Nervensystem beobachtet gewissermaßen selbst die sich ändernden eigenen Zustände. SIEBERT (1999) hält aber auch Lernprozesse durch soziale Interaktion, im Sinne eines gemäßigten Konstruktivismus, für möglich.

Es werden drei Arten von konstruktivistischen Lernprozessen unterschieden, siehe dazu auch REICH (2005):

Konstruktion Dies ist die Aneignung neuer Wissensbestände mit subjektiver Bedeutungszuschreibung. Sie ist besonders stark im Kindesalter, es werden die Konzepte beibehalten, die sich als besonders lebensnützlich (viabel) herausstellen.

Rekonstruktion Hier geht es um die Re-Interpretation neuer Konzepte durch Rückgriff auf bereits in der kognitiven Struktur vorhandene Konzepte, Überzeugungen und Gewissheiten im Sinne einer Assimilation.

Dekonstruktion Dieser schwierig zu erreichende Punkt ist das In-Frage-Stellen von Überzeugungen und Wahrheitsansprüchen als Akkommodation der eigenen Wissensstruktur, wenn sich diese für, meist abstraktere, Bereiche als nicht viabel erwiesen haben.

Aus den Ansätzen des lernpsychologischen Konstruktivismus lassen sich nach MIETZEL (2007, S.46ff) verschiedene pädagogische Grundsätze ableiten. Zum einen geschieht die Verarbeitung neuer Informationen immer in Abhängigkeit des aktuellen, subjektiven Verständnisses. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Interpretation je nach Schüler. Dessen Verständnis muss mitgeteilt und von der Lehrperson erkannt werden. Dieses Erkennen ist als eine wesentliche Komponente des Lehrkompetenz anzusehen und ist im Fall der Physik dem pedagogical content knowledge (PCK) zuzuordnen (siehe Abschn. 4). Dafür ist eine Fehlerkultur notwendig, damit Schüler schamfrei ihr Vorstellungen verbalisieren können. Lern- und Prüfungssituationen müssen klar voneinander getrennt werden und über das eigene subjektive Verständnis muss dringend kommuniziert werden, um eine soziale Aushandlung des Verständnisses und damit eine soziale Konstruktion von Wissensbeständen zu erreichen. Der gegenseitige Austausch über individuelle Konstruktionen, ermöglichen es, die eigene Sichtweise mit denen der anderen zu vereinbaren (MIETZEL, 2007). In der Verantwortung des Lehrers liegt es, den Austausch von Vorstellungen und damit gemeinsames Problemlösen anzuregen. Schließlich trägt auch der Schüler eine deutlich höhere Verantwortung für das eigene Lernen, wozu gleichfalls metakognitive Fähigkeiten ausgeprägt werden müssen. Zusammenfassen lassen sich fünf notwendige Bedingungen aufstellen:

1. Vorhandenes Wissen wird aktiviert.
2. Pädagogische Erfahrungen werden auf vorhandenes Wissen bezogen.

3. Es werden Faktoren für die Entwicklung intrinsischer Motivation geschaffen.
4. Die Konstruktion neuen, individuellen Wissens wird ermöglicht.
5. Dieses wird angewendet, bewertet und überarbeitet.

Konstruktivistisch gestaltete Lernumgebungen können dabei auch problematisiertes Lernen einschließen, wobei realitätsnahe Situationen als Lernanreiz dienen. Für eine authentische Lernaktivität spricht auch, dass kognitive Prozesse stets situativ an räumlichen und sozialen Kontext gebunden sind. Wissen kann nicht von der Lern- und Anwendungssituation getrennt werden (GREENO et al., 1993). „Eine authentische Lernumgebung liegt vor, wenn die kognitiven Anforderungen – d.h. das erforderliche Denken – mit den kognitiven Anforderungen derjenigen Umgebung übereinstimmen, auf die wir den Lernenden vorbereiten.“ (HONEBEIN et al., 1993)

Teilweise ist diese Authentizität für die Ausbildung von Lehrpersonen problematisch, da im Lehramt im Vergleich zur Medizin unglaublich viel Vorerfahrung durch Beobachtung besteht und dadurch Wissen vom Lehren und Lernen aufgebaut wird, „dem Anschein nach unauslöschbare Eindrücke“ (KENNEDY, 1990), die dann „unglaublich schwer zu erschüttern“ sind. Es ist außerordentlich schwierig, dieses vorhandene Wissen im Sinne einer Dekonstruktion und damit die Professionalisierung in Frage zu stellen, verstärkt wird dies durch die passive Rolle in Vorlesungen und nur unzureichend vorhandene Möglichkeiten zum Transfer. Das Lernen auf Vorrat erweist sich als problematisch, vielmehr wäre aktive Arbeit und ein In-Frage-Stellen des eigenen Vorwissens notwendig (MIETZEL, 2007). Hinzu kommt, dass der Vorlesungsstoff nicht an das Vorwissen der zukünftigen Lehrer angepasst wird und eine schlechte Fehlerkultur herrscht. Die Erfahrungen aus der eigenen Schulzeit bestimmen wesentlich das Unterrichtshandeln ausgebildeter Lehrer. PAJARES (1992) kommt zu dem ernüchterten Schluss, dass „aus Studierenden Lehrer werden, die unfähig und in ihrem Unterbewusstsein auch nicht bereit sind, ein System zu beeinflussen, das einer Reform bedarf.“

Für die Auseinandersetzung mit Alternativen können jedoch konkrete Vorschläge zur Unterrichtsgestaltung – auch für die Vermittlung der Quantenphysik auf Schulniveau – helfen. Diese können prinzipiell an zukünftigen Lehrer vermittelt und von diesen eingeübt werden. Entscheidend ist hier die aktive Praxis.

Nach diesem Beispiel negativer Auswirkungen der sozialen Einbindung konstruktivistischen Lernens soll noch kurz das Verhältnis von individuellem zu sozialem Lernen verdeutlicht werden. Wesentlich ist, dass zu einem Verständnis verschiedener Lerninhalte nur der Schüler selbst gelangen kann. Der Lehrer kann aber helfen, Unzulänglichkeiten in den eigenen Vorstellungen aufzudecken, die eigene Motivation zu entwickeln und die erkannten Verständnislücken zu verringern. „Lernprozesse werden dadurch in Gang gesetzt, dass Ereignisse beobachtet bzw. erfahren werden, die sich mit dem vorhandenen Wissen nicht erklären lassen.“ (MIETZEL, 2007, S.49) Im besten Fall entsteht ein kognitiver Konflikt und die Motivation, diesen aus Unbehagen zu beseitigen. Allerdings können die nicht zum

eigenen Weltbild passenden, aber viableren Beobachtungen und Konzepte auch lediglich uminterpretiert werden. Die Diskrepanz muss wahrgenommen werden und die Bereitschaft vorhanden sein, den kognitiven Konflikt tatsächlich zu lösen. Soziale Unterstützung und eine Lernumgebung, die Angstfreiheit garantiert, können dabei wesentlich helfen.

Die Forschungsergebnisse lassen sich nach HENDRY (1996) so zusammenfassen: „Wenn Kinder die Gelegenheit erhalten, sich ihre Vorstellungen und Vorgehensweisen in Paaren und kleinen Gruppen gegenseitig zu erklären, dabei Zustimmung und Ablehnung erfahren, erreichen sie ein höheres Denkniveau als andere Schüler, die eine solche Gelegenheit nicht erhalten haben.“

Ein weiterer Hinweis auf die Wirksamkeit konstruktivistisch orientierter Lernumgebungen sind die hohen Testergebnisse im Forced Concept Inventory (FCI), wobei ein hohes Maß an Interaktivität empfohlen, eine zu hohe Autonomie der Schüler aber nicht empfohlen wird (Überblick mit Vergleichsrahmen in DANCY und HENDERSON, 2007).

Ein Beispiel für solche Lernumgebungen berichtet SAUL und REDISH (1997). Sie konnten zeigen, dass ein spezieller Workshop, der besonders Wert auf Konstruktion konzeptioneller und mathematischer Modelle und Aneignung naturwissenschaftlicher Methoden im Sinne des Konstruktivismus legt, zu den besten Ergebnissen im Vergleich verschiedener Modelle durch Leistungstests führt.

Hinzu kommen weitere positive Effekte: MIETZEL (2007) sieht den pädagogischen Konstruktivismus als Möglichkeit die vielfältigen neuen Herausforderungen an das Bildungssystem theoretisch zu untermauern. Dazu müssen aber einige althergebrachte Annahmen über das Lernen fallengelassen werden, wie die passive Aufnahme des durch den Lehrer vermittelten, objektiven Wissens. Vielmehr muss die eigenständige Bewertung und Auswahl von Informationen durch den Schüler erfolgen. Das selbstständige Lernen, aber vor allem der Entwicklung kritischen Denkens als Konstruktion eines eigenen Verständnisses, nicht die fertige Interpretation der Welt durch den Lehrer, ist als Ideal anzustreben. Der Lehrer wird mehr zum Lernbegleiter statt Wissensvermittler, er kann zwar auch Informationen bereitstellen, aber die Elaboration dieser muss eigenständig durch den Lernenden geschehen. JENKINS (2000, S.600) erläutert hierzu: „[...] constructivist stance in education is often bound up with political, ethical or moral claims, especially when constructivist ideas are intimately linked with such issues as ‚the emancipation of student learning‘, ‚socially empowering groups or individuals‘, ‚having respect for‘ students or their ideas [...]“ Hinzu kommt ein motivationaler Aspekt, denn: „Thus, students who engage their constructive process also engage their intrinsic motivation.“ (Glynn and Duit in YAGER, 1995, S.10) Speziell für die Naturwissenschaften konnten die Vorteile eines konstruktivistischen Vorgehen im Iowa Chautauqua Program (YAGER, 1995, S.55ff) mit breit angelegter Lehrerfortbildung bestätigt werden: Im Vergleich zu textbuchorientierten Unterricht zeigten sich bessere Leistungen im Bereich NOS² und höheres Verständnis und Fähigkeit zur Anwendung wesentlicher naturwissenschaftlicher Konzepte und Prozesse. Diese können

² nature of science, Natur der Naturwissenschaften (NOS)

besser transferiert werden, außerdem zeigt sich eine positivere Einstellung gegenüber Naturwissenschaften und höhere kreative Fähigkeiten.

Ein Beispiel für eine konstruktivistische Lernumgebung ist das cognitive apprenticeship (CA), welches auch für den Hochschulbereich praktikabel ist. Als dessen Grundsatz erläutert DUIT (1991, S.53): „In this view, understanding can be considered as competent performance of tasks valued by the group in the social context where they normally occur.“ Der Aufbau der individuellen Kompetenz geschieht dabei über ein graduelles Nachlassen der Unterstützung durch den Experten, die Verantwortung für die eigene Leistung geht an den Lernenden über, oder kurz: „[...] expert performance is modeled and learners are coached in cooperative performance of the tasks.“ Dieser Übergang geschieht in drei typischen Stufen (DUIT, 1991, S.56):

Modeling Die notwendigen Arbeitsschritte werden durch einen Experten vorgestellt und durch die Schüler beobachtet. Dadurch entwickeln diese ein individuelles konzeptionelles Modell der kognitiven Prozesse, welches zur Verwirklichung der Arbeitsschritte notwendig ist.

Coaching Der Lehrer beobachtet den Lernenden bei der Ausführung der Arbeitsschritte, gibt Hilfestellungen und Rückmeldung. Er modifiziert ggf. die Aufgabestellung, um eine individuell angepassten Zugang des Schülers zum Lernstoff zu erreichen.

Scaffolding Das Gerüst an Hilfestellungen durch den Lehrer mit Vorschläge und unterstützenden Medien wird langsam zurückgenommen und der Schüler lernt die Arbeitsschritte selbstständig und -verantwortlich durchzuführen.

ANDERSON und ROTH (1989) adaptierten diesen CA-Ansatz zur Förderung von Konzeptwechselprozessen. Dafür wurden Hilfestellungen geschaffen, um den sozialen Aspekt zusätzlich zu stärken und eine naturwissenschaftliche Lerngemeinschaft zu formen:

Schülern werden Probleme gestellt, um das naturwissenschaftliche Denken anzuregen, welche entscheidend für die Überwindung inadäquater Perspektiven ist. Dabei werden auch zunehmend schülergeleitete Dialoge, „scaffolded dialogue“, genutzt. Die Analyse und das Explizit-machen des Vorwissens, speziell der Schülervorstellungen, sind notwendig, um naturwissenschaftliches Wissen in die eigene Wissensbasis zu integrieren und eigenständig nutzbar machen zu können. Denn wie DUIT (1991, S.3) ausführt: „Conceptual understanding is more important than rote memorization.“

Konstruktivismus und Quantenphysik

Der Konstruktivismus als auch die Quantenphysik scheinen eine Gemeinsamkeit zu besitzen: In beiden ist ein vollständiges Wissen über die Welt, wie sie wirklich ist, unmöglich. Die Gründe dafür sind aber unterschiedlicher Natur: Die Quantenphysik ist nicht aus

gewöhnlichem Erfahrungswissen abgeleitet, es herrscht in ihrem Gültigkeitsbereich ein ontologischer Holismus im Gegensatz zur Reduzier- und Separierbarkeit der klassischen Welt. Das Unwissen liegt in Quantenphysik in der Sache selbst und ist keine persönliche oder soziale Konstruktion. Der Holismus des Konstruktivismus ist epistemologischer Natur, also durch Erkenntnisprozesse begrenzt. KARAKOSTAS und HADZIDAKI (2005) heben hervor, dass der nicht-separable Charakter der denkunabhängigen Realität naturwissenschaftlich etabliert und metaphysisch postuliert ist. Er ist kein Artefakt der individuellen oder sozial ausgehandelten Konstruktion. Dies zeigt sich auch an den objektiv festlegbaren Grenzen des quantenphysikalischen Wissens. Vielmehr sehen KARAKOSTAS und HADZIDAKI (2005, S.626) eine große Gefahr in der unzulässigen Vermischung der beiden Grenzen von Wissen: „We observed, for instance, that the constructivist idea concerning the sensorial or social origin of scientific knowledge often results to the downplaying or neglect of scientific content.“ Um den Unterschied herauszuarbeiten, empfehlen sie das Wesen der Naturwissenschaften zu klären: „we take the view that the scope of science education is to lead students to ‚reconstruct‘ their initial knowledge through a process that *has to be performed under the close guidance of the teacher who attempts to communicate what has recently been called the ‚Nature of Science‘*.“ und dabei die historische und philosophische Entwicklung des naturwissenschaftlichen Denkens als Kontextbezug zu wählen.

2.2. Aneignung neuen Wissens durch Conceptual Change

Conceptual Change (CC) ist ein Fachbegriff für die Veränderung des begrifflichen Verständnisses eines physikalischen Konzeptes. Dieser Konzeptwechsel umfasst die Elaboration von Konzepten durch das Bewusstwerden des eigenen Lernprozesses. Damit geht die Erhöhung der individuellen kognitiven Stufe eines Konzepts und die Verbesserung der Problemlösefähigkeiten einher (DUIT, 1991, S.30). Sehr allgemein wird Conceptual Change durch YAGER (Duit/Glynn in 1995, S.3) „as a dynamic process of building, organizing, and elaborating knowledge of the natural world. The cornerstones of this knowledge are conceptual models.“ beschrieben. Diese konzeptuellen Modelle sind kognitive Repräsentationen realer Gegenstände, die konsistent mit naturwissenschaftlichen Vorstellungen sind. Nach VOSNIADOU (1994, S.46ff) geschieht der Konzeptwechsel nicht durch die Anreicherung atomarer Konzepte, sondern diese werden von Anfang an in möglicherweise naive theoretische Strukturen eingebaut. Mentale Modelle sind dynamische Repräsentationen, welche mental manipuliert werden können, um kausale Erklärungen und Vorhersagen physikalischer Phänomene zu treffen. Sie fußen auf der darunterliegenden Wissensstruktur. Mentale Modelle entstehen meist spontan in spezifischen Problemlösesituationen, können aber, falls sie sich als nützlich erweisen, auch im Langzeitgedächtnis gespeichert werden. Misskonzepte entstehen, wenn Lernende versuchen, inkonsistente Informationen zu integrieren und damit künstliche, ab einem bestimmten Level inviable mentale Modelle zu

erschaffen. Konzeptuelle Modelle sind kognitive Systeme von verbundenen Konzepten. Sie können je nach Entwicklungsstufe der Lernenden unterschiedlich komplex sein und sich fortschreitend entwickeln. Sie werden von mentalen Modellen dadurch unterschieden, dass sie mit der gängigen naturwissenschaftlichen Vorstellung übereinstimmen. Die mentalen Modelle stimmen beim Novizen hingegen nicht mit den physikalisch anerkannten Theorien überein. Ein Konzeptwechsel kann beispielsweise durch den Test eigener Hypothesen und Diskussionen der individuellen Modelle in der Gruppe gefördert werden. Dazu müssen die studentischen Lerner-Theorien vom Lehrer ernst genommen und das metakonzeptionelles Verständnis – individuell und als Gruppenprozess – gefördert werden.

Es lassen sich vier Bedingungen aufführen, damit ein Konzeptwechsel und damit eine Akkommodation der kognitiven Struktur des Lernenden mit der Ersetzung alter Konzepte durch neue mit größerer Viabilität (POSNER et al., 1982, S.214) vollzogen wird:

1. Der Lerner müssen mit ihren bisherigen Konzepten unzufrieden sein.
2. Der Lernende muss ein minimales Verständnis für das neue Konzept besitzen.
3. Das neue Konzept muss von Anfang an plausibel erscheinen.
4. Das neue Konzept muss Erklärungs- und Vorhersagekraft besitzen.

DUIT (1991, S.15) empfiehlt für den Konzeptwechsel Erfahrungen aus der Alltagswelt als Startpunkt zu wählen und Analogien als Brückenstrategie zu verwenden. Problematisch sind solche Brückenstrategien in der modernen Physik. Es kann nach Überzeugung vieler Didaktiker in der Quantenphysik nur eine sprunghafte Ausbildung einer neuen Sichtweise geben, da sich hier lebensweltliche und physikalische Sichtweise grundsätzlich unterscheiden, es keinen kontinuierlichen Weg zwischen diesen Sichtweisen geben kann und Brüche auf Grund studentischer Schwierigkeiten deutlich werden. Nach konstruktivistischer Auffassung muss der Konzeptwechsel von jedem Lerner individuell vollzogen werden. Dies ist aber nicht nur eine rationale Entscheidung, da motivationale und affektive Faktoren ebenfalls eingehen und der Konzeptwechsel, wie Lernen allgemein, an die soziale Lernsituation gebunden ist. Ein wesentlicher Punkt des Wechsels ist das Bewusstwerden der Studentenvorstellungen durch Explizit-machen als metakognitive Tätigkeit, der Lernende wird einer kognitiven Konfliktsituation ausgesetzt, um schließlich neue Konzepte konstruieren zu können (YAGER, 1995, S.53). Dies kann im Sinne der im nächsten Abschnitt vorgestellten Hochschuldidaktischen Rekonstruktion auch mit Analyse der Schülervorstellungen durch die Lehramtsstudenten geschehen, da diese auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen doch ähnlich gelagerte Präkonzepte haben. Dies hilft, die eigenen Fehlkonzepte abzubauen und stellt außerdem eine wichtige Kompetenz des angehenden Lehrers dar.

Die Verbindung mit vorhandenen Konzepten und die soziale Anwendbarkeit sind wesentliche Kriterien für das konzeptionelle Verständnis (DUIT, 1991; VYGOTSKY, 1986, S.47ff), wobei aber nur das Hinzufügen neuer Informationen nicht ausreicht und sich auch bereits vorhandenes Wissen ändern muss.

Viele Konzepte haben sich im Alltag des Lernalers bewährt. Es zeigt sich also oft eine seltsame Trennung der in einzelnen, persönlichen Theorien und dem, was in der Physikklasse geschieht, deren Phänomene mit dem richtigen Beschreibungsvokabular nur zum Test hin gelernt werden: „It is only in the science classroom, under controlled conditions, that the science teacher is able to demonstrate to the students the shortcomings of their beliefs.“ (DUIT, 1991, S.13). Auch Duit nennt vielfältige Dinge, die dem Konzeptwechsel entgegenstehen: alltägliche Sinneseindrücke, ungenaue Alltagssprache, die innere Struktur des Gehirns, die soziale Umgebung, Massenmedien, aber auch unklare Anleitungen und Aufgabenstellungen, welche oft mit einem naiven Positivismus einhergehen (Duit in DUIT, 1991, S.74f).

Die Hilfe zum Konzeptwechsel muss über die metakognitive Wahrnehmung der vorhandenen Schüler- und Lehrerkonzepte, aber auch der Lehrerkonzepte über die Schülerkonzepte beginnen. Denn auch auf Lehrerseite zeigen sich falsche physikalische Konzepte und passive Lehrkonzepte, die sich mit Veränderung von Lernerpräkonzepten schlecht vertragen (GUNSTONE und NORTHFIELD, 1986).

Das im nächsten Abschnitt vorgestellte Modell der Didaktischen Rekonstruktion in der Lehrerbildung ERTE vermittelt Lehrern eine konstruktivistische Sichtweise und ermöglicht die Analyse genau dieser Konzepte, wobei auch affektive Komponenten des Konzeptwechsels beachtet werden. Ein wichtiger Punkt in diesem Modell sind die Studentenvorstellungen. Nach SINGH (2008, 2001) zeigen Studenten große Schwierigkeit, die Konzepte der Quantenphysik auf Hochschulebene zu verstehen, da sie zu sehr nur auf den Formalismus geprägt sind. Die Probleme, beispielsweise beim Wissen über stationäre Zustände, Eigenzustände und Zeitabhängigkeit von Erwartungswerten, entstehen aus der Übergeneralisierung von Konzepten³. SINGH (2008, S.280) sieht große studentische Schwierigkeiten in der Unterscheidung zwischen stationären und nichtstationären Zuständen, welche im Allgemeinen eine nichttriviale Zeitabhängigkeit auf Grund unterschiedlicher Phasenfaktoren einer linearen Superposition besitzen. Hinzu kommen Schwierigkeiten, die Bedeutung von Erwartungswerten zu erfassen sowie das Messpostulat, die Struktur des Hilbertraumes und die Form von Wellenfunktionen richtig zu interpretieren. Dies ist laut VOSNIADOU (1994) auf die fachlich falsche Assimilation der neuen quantenphysikalischen Konzepte in bestehende klassische konzeptuelle Strukturen zurückzuführen.

Besonders schwierig ist es für die Lernenden, mathematische Repräsentationen auf konkrete Fälle anzuwenden. Ein Test von ROBERTSON und KOHNLE (2010) untersucht

³ Als Beispiel für die zeitunabhängige Schrödingergleichung wird in Quantenphysikkursen sehr häufig folgende Vereinfachung gewählt: Die Anwendung des Hamilton-Operators auf einen beliebigen Zustand $\hat{H}\psi = E\psi$ liefert laut Aussage sehr vieler Studenten immer denselben Wert. Dies gilt aber nur für stationäre Zustände, für einen beliebigen Zustand als Linearkombination von stationären Zuständen folgt: $\hat{H}\psi = \sum_{n=1}^{\infty} C_n E_n \phi_n \neq E\psi$ mit ϕ_n als stationärer Zustand und $C_n = \langle \phi_n | \psi \rangle$. Die zeitunabhängige Schrödingergleichung wurde in einem Kontext gelernt und dann in nicht anwendbare Gebiete übertragen (ausführlich bei SINGH, 2008).

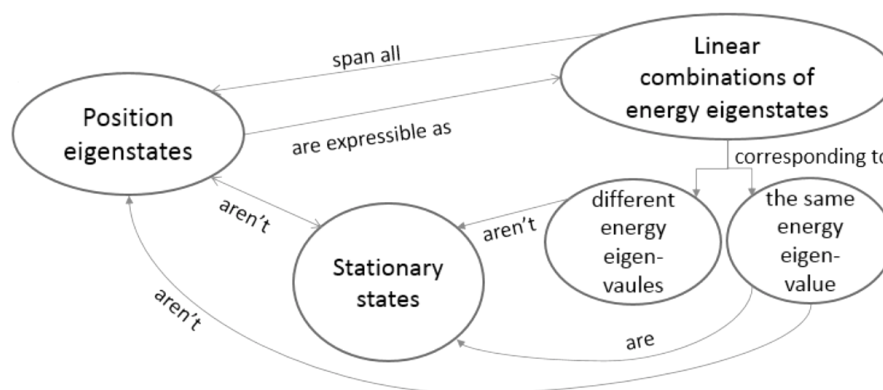


Abbildung 2.1.: Ein Beispiel für das Verhältnis problematischer quantenphysikalischer Konzepte nach ZUCCARINI et al. (2013, S.6)

das Verständnis von Studenten über von quantenphysikalischen Wahrscheinlichkeiten, Energie- und Ortsmessungen, die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation, Superpositionen von Zuständen, das Pauli-Prinzip und quantenmechanisches Tunneln als stark mathematisierte Probleme. Es zeigten sich Schwierigkeiten der Studenten im Verständnis wiederholter Energie- und Ortsmessungen sowie des Quantentunnelns⁴ wiederum auf Grund von Übergeneralisierungen quantenmechanischer Prinzipien, Schwierigkeiten mit der Wahrscheinlichkeitsinterpretation, falschen Analogien zu klassischen Situationen und ungünstiger Vermischung verwandter Konzepte. Dies geschieht insbesondere deshalb, da die Quantenphysik weit außerhalb persönlicher Erfahrungen, oft kontraintuitiv, technisch und abstrakt ist. Diese Schwierigkeiten sind unabhängig vom Bildungshintergrund der Studenten, der Art der Vermittlung oder verwendeter Lehrbücher, wie SINGH (2008) zeigen konnte.

Ein Großteil der Lehramtsstudenten benennen das Bohrsche Modell als ihre Vorstellung vom Atom, weisen Elektronen eine permanente Lokalisierung zu, erkennen die ontologische Unbestimmtheit von Quantenobjekten nicht und können oft nichts über die quantenmechanische Nichtlokalität, beispielsweise zum EPR-Paradoxon oder die Bell-Ungleichung aussagen (Müller & Wiesner in ZOLLMAN, 1999, S.20-22).

Nach ROBERTSON und KOHNLE (2010, S.1) haben sich Studenten im besten Fall daran gewöhnt, notwendige formale Berechnungen durchzuführen ohne aber geeignete mentale Modelle oder visuelle Repräsentationen quantenphysikalischer Konzepte zu entwickeln, die für ein tiefergehendes Verständnis und die Fähigkeit zum Problemlösen unerlässlich wären. Es zeigt sich ein geringes kritisches Denken, da dies meist nicht erforderlich ist. Konzepte werden meist als isolierte mathematische Ableitungen dargestellt, die aber oft voneinander abhängen. Dadurch entwickeln Studenten *Überlebensstrategien* für formales Rechnen, sie sind aber nicht in der Lage, qualitative Schlussfolgerungen aus quantitativen Berechnungen

⁴ Siehe zum Energieverlust beim Tunneln WITTMANN et al. (2005)

zu ziehen. Allgemein konnte bereits UHDE (2012) solche Probleme für Schüler in seiner Arbeit aufzeigen: „Was hat man erreicht, wenn die Schüler physikalische Formeln als Werkzeug zum Berechnen vorstrukturierter Situationen verwenden können, die physikalische Bedeutung und deren Zusammenhang zur Struktur der Formel jedoch nicht verstehen? An dieser Stelle ist ein Umdenken dahingehend erforderlich, dass zuerst die grundlegenden Zusammenhänge zwischen physikalischer Bedeutung und entsprechender mathematischer Repräsentation gelehrt und gelernt werden, bevor die Anwendung zur Berechnung erfolgt.“

2.3. Die Hochschuldidaktische Rekonstruktion

Die Didaktische Rekonstruktion wurde als Modell in der Biologiedidaktik der Universität Oldenburg und der Physikdidaktik am Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik (IPN) Kiel als Forschungsrahmen entwickelt (vgl. KATTMANN et al., 1997). Es folgt einer gemäßigt konstruktivistischen Position: „Fachwissenschaftliche Aussagen werden als Konstrukte der Wissenschaftlergemeinschaft aufgefasst und Schülervorstellungen werden im Kontext der persönlichen Überzeugungen die gleiche Kohärenz und Stimmigkeit zugebilligt.“ (LOHMANN, 2006, S.67), wobei Wert auf die aktive (Re-)Konstruktion von Wissen auf Basis des Vorwissens gelegt wird.

Die Fachdidaktik nimmt dabei eine doppelte Metaposition als Teil und Gegenüber der Fachwissenschaft und Vermittler zwischen dieser und der Lebenswelt der Schüler und ihren Vorstellungen ein. „Sie [die Vorstellungen, A.d.V.] sollten deshalb nicht allein aus der fachlichen Perspektive als Fehlvorstellungen beurteilt werden, die es zu beseitigen gilt. Vielmehr sollte nach Möglichkeiten gesucht werden, wie die Lernervorstellungen und die fachlich geklärten Vorstellungen im Unterricht [...] zusammengebracht werden können“ (LOHMANN, 2006, S.68). Werden Präkonzepte im Unterricht berücksichtigt, kann sich dies positiv auf den Lernerfolg auswirken (BORN, 2007).

Ziel der Didaktischen Rekonstruktionen ist die didaktische Strukturierung als themenspezifische, aber lernerbezogene Unterrichtsplanung, mit der Rekonstruktion des Fachwissens aus der Lebenswelt-Perspektive der Schüler. Sie liefert Lehrprinzipien, Unterrichtskonzepte und curriculare Einheiten. Sie stellt damit ein Modell der *Elementarisierung* dar. Diese umfasst neben der methodischen Elementarisierung, die Herausarbeitung des zentralen Kerns als inhaltliche Elementarisierung, elementarer Sinneinheiten in der begrifflichen Elementarisierung und vor allem eine Reduktion durch

- Beschränkung auf
 - Phänomene oder experimentelle Ergebnisse
 - Musterbeispiele
 - zielrelevante Aspekte

– Prinzipien

- Vernachlässigung von untergeordneten Einflussgrößen
- und veranschaulichende Darstellung mit angemessener Repräsentation

Als die drei wesentlichen Kriterien für die Elementarisierung gelten die Fachgerechtigkeit, die Schülergerechtigkeit und die Anschlussfähigkeit der erarbeiteten Struktur. Für die Curriculum-Entwicklung in der Hochschule betonen REUSSER und MESSNER (2002, S.288) daher neben den fachwissenschaftlichen Kenntnissen eine weitere Kompetenz: „Für das Verständnis schulischer Lernprozesse ebenso wichtig ist auch das Verständnis der Alltagsvorstellungen der Schüler, ihre erfahrungsbezogenen Bewusstseinsinhalte und ihre Lebenswelt, die in der Wissenschaft ausgeblendet werden. Aus diesem Grunde müssen die fachwissenschaftlichen Inhalte für den Unterricht unter pädagogischen und didaktischen Gesichtspunkten rekonstruiert werden.“ Die Verfasser betonen, dass Fachstrukturen grundsätzlich nicht den Lernstrukturen entsprechen, die Logik der Fachsystematik nicht der Aneignung. Vielmehr fordern sie eine klare Trennung fachwissenschaftlicher und fachdidaktischer Veranstaltungen, um Lehramtsstudierenden in relevanten Fachthemen eigene Lernerfahrungen sammeln zu lassen, die sich dann „vom Standpunkt des Lehrens aus mit Unterrichtsinhalten befassen können“. Die Veranstaltungen sollten aber zeitlich nicht zu weit auseinanderliegen. Die praktische Reflexion theoretischen Wissens, z.B. mit fallbezogene Arbeit in der Lehramtsausbildung, ist notwendig, um für das Handeln im beruflichen Alltag wirkungsvoll zu sein.

„Da zwischen dem Lernen in der Schule und Lernen an der Universität kein qualitativer Unterschied besteht, liegt es nahe, Erkenntnisse und Methoden sowie Lehr- und Lernstrategien aus dem schulischen auf den Hochschulbereich zu übertragen.“ (LOHMANN, 2006, S.65) So berücksichtigt die akademische Ausbildung selten die physikalischen als auch der lerntheoretischen Präkonzepte der Studierenden. LOHMANN (2006, S.66) erläutert dazu: „Die Wirksamkeit der Lehrerausbildung ist also in hohem Maße davon abhängig, inwieweit das Vorwissen und die vorhandenen Vorstellungen der Studierenden zum Lehren und Lernen in ihrem Fach berücksichtigt werden. Die konsequente Übernahme eines konstruktivistischen Lehr- und Lernbegriffs in die Lehrerausbildung erfordert von den fachdidaktischen Lehrveranstaltungen, dass nicht nur (wie z.B. im Modell der Didaktischen Rekonstruktion) Schülervorstellungen zu fachlichen Bereichen thematisiert werden, sondern auch das Vorwissen und die Vorstellungen der angehenden Lehrer über das Lehren und Lernen in diesen Bereichen.“

Leider fehlt systematische Forschung in den Fachdidaktiken nach Didaktischer Rekonstruktion noch weitestgehend, obwohl Ansätze (NAWRATH, 2010; KRAYNOVA, 2012; WILMS, 2011) vorhanden sind.

Für die Didaktische Rekonstruktion im akademischen Bereich existieren zwei sich ähnelnde Modelle von LOHMANN (2006) und VAN DIJK und KATTMANN (2007), die in den nächsten Abschnitten genauer vorgestellt und später zur Analyse und Planung verwendet werden.

Hochschuldidaktische Rekonstruktion nach Lohmann

Das Hochschuldidaktische Modell von LOHMANN (2006) berücksichtigt neben kognitiven Wissenselementen von Studierenden, wie dem fachlichen Wissen und Lehr-Lernvorstellungen auch subjektive Theorien aus wissenschaftlicher Literatur, persönlichen Erfahrungen und daraus gebildeten normativen, evaluativen und affektiven Komponenten wie Einstellungen und Emotionen. Diese Vorstellungen, im Englischen *beliefs* genannt, sind zeitlich relativ stabil und können meist erst durch die Erfahrung des „praktischen Scheiterns“ (MIKELSKIS-SEIFERT und FISCHLER, 2003) geändert werden. Lohmann führt aus: „Lehramtsstudierende treten mit sozialisationsbedingten Vorstellungen zu Schule und Unterricht in die Lehrerausbildung ein, die sich als weitestgehend veränderungsresistent erweisen.“ Das Modell versucht Prinzipien des Instruktionsparadigmas der traditionellen Didaktik mit überwiegend rezeptiver Funktion des Lernenden aufzubrechen. Es nimmt gegenüber des klassischen Modells der Didaktischen Rekonstruktion eine zweite Metaposition ein, da nicht nur fachliche Lehr- und Lernprozesse fachdidaktisch geklärt und strukturiert werden, sondern diese unter Berücksichtigung der Vorstellungen der Lehramtsstudenten zum Unterrichtsthema und dessen Vermittlung als Ausgangspunkt dienen, um über die hochschuldidaktische Strukturierung mit Lehrleitlinien, Unterrichtsgängen und Vorlesungen nachzudenken.

Diese Vorstellungen haben selektive Filterfunktion für Informationen, die sich in das eigene Überzeugungssystem integrieren lassen; sie haben handlungssteuernde Funktion hinsichtlich Lehrer- und Schülerrolle und der didaktischen Strukturierung und Interaktion. Sie beeinflussen ganz wesentlich die Unterrichtsqualität und den Lernerfolg. Um die Vorstellungen der Studenten ändern zu können, müssen diese erforscht, insbesondere typisiert werden, um aktiv in Lernprozessen an sie anknüpfen zu können. Die Vorstellungen können dazu in der Hochschule thematisiert, reflektiert und erweitert werden. Studierende benötigen dazu die Kompetenz die Lernerperspektive einzunehmen, um Präkonzepte und Lernschwierigkeiten der Schüler besser verstehen zu können. Hinzu kommt die Verknüpfung der erweiterten Lehr-Lern-Vorstellungen mit fachdidaktischen Wissen und eigener praktischer Unterrichtserfahrung. Nach LOHMANN (2006, S.69) müssen Fachdidaktiken konsequent Lehr-/Lernprozesse sowohl in der Schule als auch in der Lehramtsausbildung erforschen. Die Fachdidaktik wird damit nach LOHMANN (2006, S.70) zum „Erschließer, diplomatischen Vermittler und Brückenbauer von vier Welten, der Fachwissenschaft, der Lebenswelt der Schüler, der Fachdidaktik und den Vorstellungen der Studierenden.“

Die fachdidaktische Klärung wird weiter als beim Modell von Kattman im nächsten Abschnitt gefasst, da die kritische Untersuchung von fachdidaktischen Aussagen enthält: Prinzipien, Leitlinien, Unterrichtskonzepten und Curriculumeinheiten zum einen unter hochschuldidaktischer Vermittlungsabsicht und zum anderen aus Sicht der Studierenden zum Unterrichtsthema und dessen Vermittlung. Die hochschuldidaktische Strukturierung ist damit als „themenspezifischer, lernerorientierter Planungsprozess, der zu grundsätzlichen

und verallgemeinerbaren Ziel-, Inhalts- und Methodenentscheidungen für die fachdidaktische Ausbildung führt. (Hochschul-)Fachdidaktiker rekonstruieren als Beobachter, wie Lehramtsstudierende in einem fachdidaktischen Bereich Kompetenzen entwickeln und auf welche Weise Lehrende, Mentoren oder Fachleiter sie als Gestalter von Lernumgebungen dabei unterstützen können.“ (LOHMANN, 2006, S.71) Die Planung ist dabei nicht linear, sondern als iterativer Perspektivenwechsel aufeinander bezogen. Die Hochschuldidaktische Rekonstruktion treibt ganz im Sinne des pädagogischen Konstruktivismus die Verschiebung des angehenden Lehrers vom Fach- zum Vermittlungsexperten voran.

Hochschuldiaktische Rekonstruktion nach Dijk und Kattmann

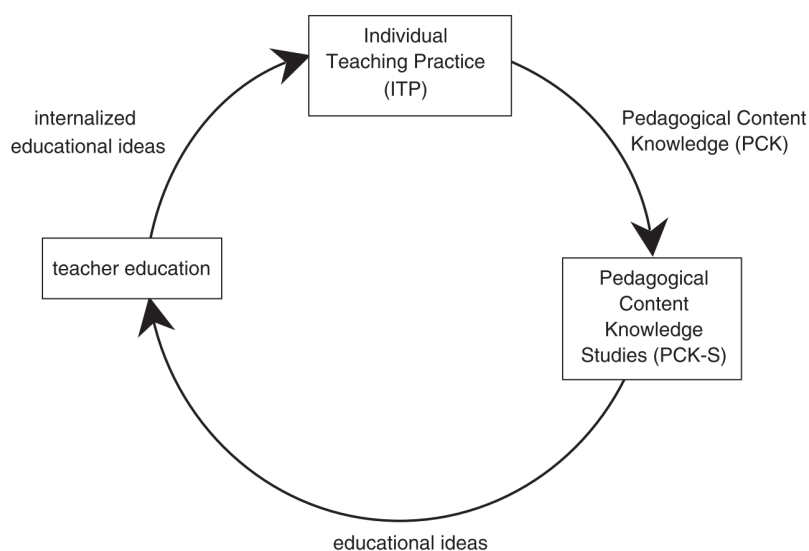


Abbildung 2.2.: Unterschiede zwischen PCK und PCK-S-Studies nach VAN DIJK und KATTMANN (2007)

Die Darstellung von VAN DIJK und KATTMANN (2007) ist der von Lohmann sehr ähnlich, legt aber besonderen Wert auf verallgemeinernde Integration von individuellem fachdidaktischen Wissen von Naturwissenschaftslehrern in die Lehrerbildung, welches, wie in Abb. 2.2 dargestellt, als pedagogical content knowledge studies (PCK-S) bezeichnet wird. Das PCK-S umfasst das Fachwissen⁵ über die Gestaltung von Lernumgebungen, der damit verbundenen Analyse von Schülervorstellungen und des fachlichen Wissens, welches sich Lehrer während ihrer individuellen Lehrerfahrung im Unterricht aneignen. „The educational ideas that are the results of what we call pedagogical content knowledge studies (PCK-S), the field within educational research that focuses its research on the PCK that teachers possess, are different from teachers’ PCK since they are extracted from their context: the

⁵ Bei Dijk/Kattmann subject matter knowledge (CK) über Lehr-/Lernprozesse

knowledge, beliefs and experiences of the individual teacher.“(VAN DIJK und KATTMANN, 2007, S.893)

PCK-S stellt eine Rekonstruktion und damit Verallgemeinerung individueller Unterrichtspraxis dar und dient der Entwicklung neuer Lernumgebungen, die in Kursen an andere Lehrer vermittelt werden können oder wie es VAN DIJK und KATTMANN (2007, S.895) ausdrücken: „PCK-S influence the design process if the teacher has acquired, during his or her teaching career, ways to present the subject knowledge in a for students understandable way. The results of this research process can then be used to improve teacher education.“ Der fachdidaktisch forschende Wissenschaftler nimmt dabei eine Vermittlerrolle ein: „These results are described, interpreted and abstracted by the researcher and reconstructed for teacher education with the intention that these ideas are internalized by the prospective teachers and form an element of the framework that enables them to learn from their experiences in their own Individual Teaching Practice.“ Das Modell für die Hochschulbil-

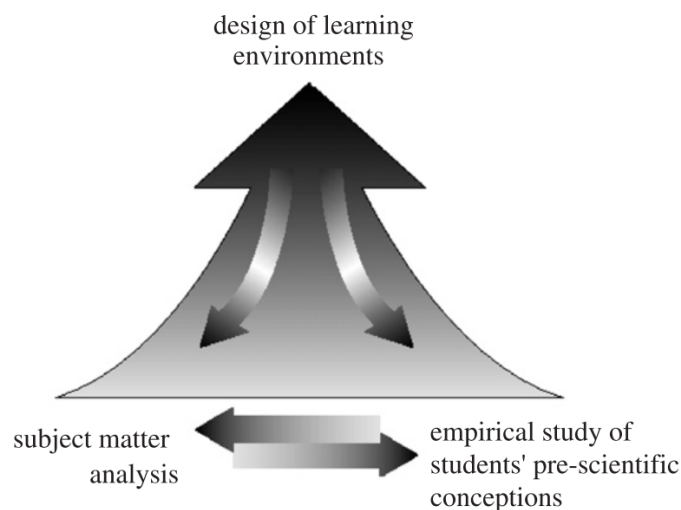


Abbildung 2.3.: Das Modell der didaktischen Rekonstruktion nach KATTMANN et al. (1997)

dung baut auf dem klassischen Konzept der Didaktischen Rekonstruktion, siehe Abb. 2.3, für den Schulunterricht auf. Die didaktische Rekonstruktion (educational reconstruction) integriert die Erforschung und Entwicklung von Lernumgebungen im Sinne Design Based

Research (DBR)⁶. Sie berücksichtigt, dass Schülervorstellungen den Rekonstruktionsprozess beeinflussen, abstrakte fachliche Konzepte müssen angereichert und in die Lebenswelt des Schülers eingebettet werden. Weiterhin werden außerdem im Modell der didaktischen Rekonstruktionen Fragen nach der exemplarischen, Gegenwarts- und Zukunftsbedeutung gestellt. Für das Design von Lernumgebungen sind zwei wesentliche Punkte zu untersuchen:

1. Die fachliche Klärung, auch Sachstrukturanalyse genannt, schließt die Identifizierung essenzieller Konzepte mit hohem Allgemeinbildungswert und Anschlussfähigkeit und ihrer Verbindungen ein. Nach KATTMANN et al. (1997) umfasst dies die Analyse fachwissenschaftlicher Aussagen und deren Grenzen, die Genese, Bedeutung, Funktion und Kontext fachlicher Begriffe und mögliche lernhinderliche oder -förderliche Vorstellungen zu diesen Fachwörtern. Hinzu kommen themenspezifische Fragen zum theoretischen Rahmen der Begriffe, ihrer historischen Einordnung, Konzepten, Grenzen der disziplinären Vorgehensweise, Anwendungsgebieten und impliziten wissenschafts- oder erkenntnistheoretischen Positionen. KIRCHER et al. (2009, S.87) weist dabei auf den deutlichen Unterschied zwischen Fach- und Sachstruktur hin: „Es entsteht daraus die Sachstruktur des Physikunterrichts. Diese unterscheidet sich von der Struktur der Physik eben dadurch, dass allgemeinbildende und pragmatische Ziele diese Struktur mitbestimmen. Die Mitbestimmung schließt natürlich auch die Lernenden mit ein.“ Insbesondere führen unterschiedliche Lehrziele zu verschiedenen Sachstrukturen.
2. Hinzu kommt die Erhebung von Schülervorstellungen und Lernvoraussetzungen:
 - Welche gibt es?
 - Stammen sie aus lebensweltlichen oder fachorientierten Kontexten?
 - Welche Bedeutung haben zentrale Fachwörter für den Schüler?
 - Welche Schülerinteressen und Lernbedürfnisse gibt es?

Diese beide Seiten werden systematisch und strukturiert aufeinander bezogen, wobei sowohl lernförderliche Verbindungen oder voraussehbare Lernschwierigkeiten als auch mögliche metafachliche und metakognitive Denkwerkzeuge beachtet werden. Beides dient der didaktischen Strukturierung und damit dem Design einer Lernumgebung.

6 Nutzenorientierter Forschungsansatz, der sowohl praktisch als auch theoretisch orientiert ist und versucht iterativ schulische Praxis und theoretische Forschung aufeinander zu beziehen. Dabei werden Forschungsergebnisse praktisch im Design von Lernumgebungen umgesetzt und diese wiederum erforscht und weiterentwickelt. Eine Vielzahl der Variablen und deren komplexe Zusammenhänge der möglichst realen Unterrichtsumgebung werden mit einem Bündel qualitativer und quantitativer Methoden im Mixed-Methods-Ansatz untersucht. Sie grenzt sich von der reinen Evaluationsforschung durch die Integration des Designs der Lernumgebung ab (Einführung in KOHNEN, 2012). Entwicklung und Forschung finden in kontinuierlichen Zyklen aus Design, Umsetzung, Analyse und Re-Design statt (WILHELM und HOPF, 2014).

Die didaktische Rekonstruktion umfasst nach KIRCHER et al. (2009, S.122) u.a. folgende heuristische Verfahren:

1. Abstrahieren von Alltagssituationen auf physikalische Gesetzmäßigkeiten
2. Idealisieren zu Begriffen mit unwirklichen Eigenschaften, z.B. Massepunkt
3. Symbolisieren durch mathematische Zeichen
4. Theoretische Modelle entwickeln
5. Gegenständliche Modelle bauen, welche die Struktur oder die Funktion verdeutlichen
6. Analogien in vertrauten Kontexten bilden

Die drei Hauptkriterien der Didaktischen Rekonstruktion lassen sich mit fachlicher und didaktischer Relevanz sowie psychologischer Angemessenheit zusammenfassen.

Das klassische Modell der Didaktischen Rekonstruktion (ER) dient als Eckpunkt des hochschuldidaktischen Modells ERTE (educational reconstruction for teacher education) in Abb. 2.4. Ziel des ERTE-Modells ist zum einen die Analyse fachdidaktischer Konzeptionen zum Anlass zu nehmen, diese mit empirischen Untersuchungen von Lehrerperspektiven in Beziehung zu setzen und damit zum anderen Leitlinien für die Lehrerbildung und die Unterrichtsentwicklung abzuleiten. Die Perspektive der Lehrer schließt deren Wissen und Überzeugungen zu Präkonzepten von Schülern, zu Repräsentationen des Fachwissens als auch zum Lehren und Design von Lernumgebungen bzw. Lehr-Lern-Sequenzen ein.

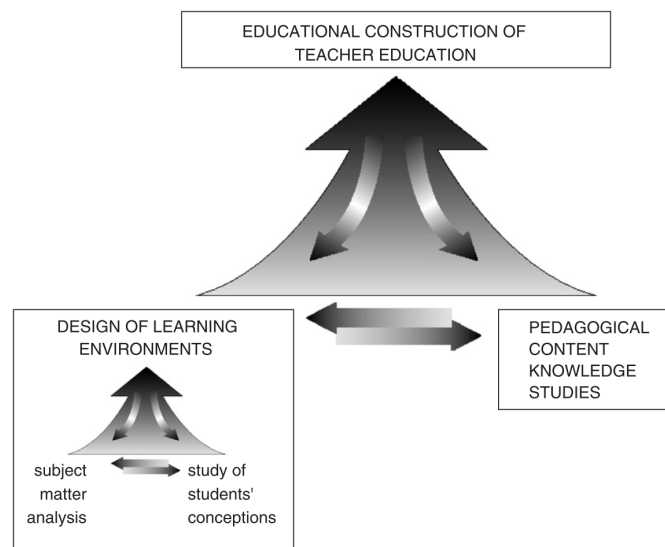


Abbildung 2.4.: ERTE-Modell nach VAN DIJK und KATTMANN (2007)

3. Komponenten der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion zur Quantenphysik

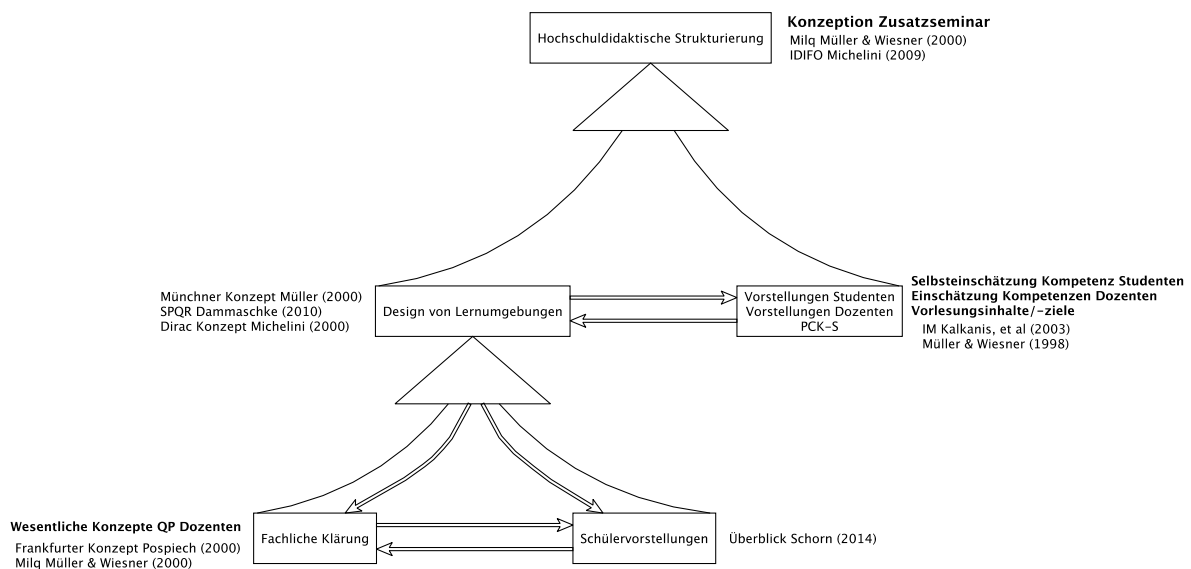


Abbildung 3.1.: Arbeiten zur hochschuldidaktischen Rekonstruktion des Themas Quantenphysik, eigene Erhebungen/Konzeptionen sind fett dargestellt

In Abbildung 3.1 sind bereits vorhandene sowie eigene Arbeiten zur Hochschuldidaktischen Rekonstruktion des Themas Quantenphysik zu sehen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sollen in diesem Kapitel kurz vorgestellt werden. Es beginnt mit der fachlichen Klärung, wobei hier als Beispiele der Quantenphysikkurs nach POSPIECH (2000) und das Münchner Konzept zur Quantenphysik WIESNER (2008) vorgestellt werden. Darauf werden die Schülervorstellungen bezogen, welche ausführlich bei SCHORN (2014) dargestellt sind. Als Beispiel für das Design einer Lernumgebung dient wiederum das Münchner Konzept mit der Erweiterung *SPQR* durch DAMMASCHKE et al. (2010). Hinzu kommt das Dirac-Konzept nach MICHELINI et al. (2000), welches durch das IDIFO-Projekt (BATTAGLIA

et al., 2010) größere Verbreitung in Italien fand. Um die hochschuldidaktische Strukturierung zu ermöglichen, werden die Vorstellungen der Studenten benötigt, welche sowohl im Instruktionsmodell nach KALKANIS et al. (2003) als auch bei MÜLLER und WIESNER (1997) deutlich werden. Hinzu kommt die eigene Befragung in der Anforderungsanalyse im Abschnitt II zur Einschätzung der studentischen Kompetenzen, sowie zu Vorlesungsinhalten und -zielen. Als Beispiel für die Konzeption einer akademischen Lernumgebung wird die Lehrerfortbildung Münchener Internet-Projekt zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik (milq) vorgestellt. Aus allen diesen Komponenten werden am Ende des jeweiligen Abschnitts Schlussfolgerungen für die eigene Seminarkonzeption gezogen und in Textboxen zusammengefasst. Im Abschnitt III folgt schließlich die Konzeption eines eigenen Seminars für die Ausbildung von Lehramtsstudenten.

3.1. Fachliche Klärung

Die fachliche Klärung dient der Identifizierung essenzieller Konzepte mit hohem Allgemeinbildungswert und hoher Anschlussfähigkeit. Sie stellt die Bedeutung, Genese und Grenzen dieser und ihre Funktion im Kontext umliegender fachlicher Begriffe, Anwendungsgebiete und wissenschaftstheoretischer Positionen dar. Lernhinderliche und -förderliche Vorstellungen zu diesen Fachwörtern können analysiert werden, um neben der Fach- auch Schülergerechtigkeit der zu planenden Lernumgebung zu erreichen.

Die Konzepte und der Formalismus der Quantenphysik machen es schwer im Sinne der didaktischen Rekonstruktion zu elementarisieren, da Fachgerechtigkeit nur mit einem hohen mathematischen Aufwand zu erlangen ist und die Konzepte auf Grund ihrer Abstraktheit nur schwer in eine schülergerechte Form zu bringen sind. Allerdings ist eine Reduktion des Lernstoffes möglich, durch Beschränkung auf wesentliche Phänomene, Experimente und Prinzipien, wie sie nachfolgend in den einzelnen genannten Konzepten vorgestellt werden. Die Bestimmung dieser Prinzipien gestattet somit eine inhaltliche Elementarisierung, um zentrale Punkte der Quantenphysik herauszuarbeiten.

Die Quantenphysik ist als einziges in der Schule behandeltes Fachgebiet noch im Fluss, heutzutage gibt es vielfältige experimentelle Umsetzungen von früheren Gedankenexperimenten und neue Anwendungsbereiche werden erschlossen. Daneben ist die philosophische Debatte über die Interpretation der Quantenphysik noch nicht abgeschlossen. Vom Standard der Kopenhagener Deutung und Ensemble-Interpretation, über ausgefallene Konzepte wie die Viele-Welten-Theorie von Everitt, Bohmsche Mechanik und consistent histories approach sind viele Deutungen möglich.

Das Frankfurter Konzept nach POSPIECH (2000) sieht als wesentlichen Punkt die Herausarbeitung der Unterschiede und der Unvereinbarkeit von Quantenmechanik und klassischer Physik, wobei auch das Zusammenwirken philosophischer und physikalischer Fragestellungen herausgehoben wird, wie beispielsweise bei Betrachtungen zur Wirklichkeit, zum

Holismus oder dem Indeterminismus im Messprozess. Dadurch kann eine kognitive Dissonanz zum klassischen Weltbild erreicht werden. Pospiechs Konzept unterscheidet sich von den anderen, da es als Hauptziel nicht der Wahrscheinlichkeitsinterpretation von Ensembles, sondern die Quantenphysik von Einzelobjekten bzw. korrelierter Systeme beleuchtet. Eine statistische Interpretation birgt hingegen die Gefahr, verborgene Parameter doch wieder über die Hintertür als Lernhindernis in den Unterricht zu integrieren.

Als zentraler Begriff wird die Unbestimmtheit, z.B. im Messprozess, angesehen, für dessen Verständnis der Begriff der Information ebenfalls von großer Bedeutung ist. Erst im Messprozess konstituieren sich klassische Eigenschaften, als „Entstehung von Fakten“. Die beiden Begriffe liefern wichtige Beiträge in der angesprochenen philosophischen Diskussion, sind aber auch für Anwendungen, wie die Beschreibung der Quanteninformationsverarbeitung, interessant. Basis für das Verständnis beider Begriffe kann nach Pospiech das Doppelspaltexperiment sein, insbesondere die Untersuchung der Weginformation. Der Begriff der quantenphysikalischen *Unbestimmtheit* steht im krassen Gegensatz zum klassischen Teilchenmodell und dessen determinierten Bahnen, welche auch in diskreter Form im Bohrschen Atommodell in Erscheinung treten¹. Diese Atomvorstellung sollte laut POSPIECH (2000) vermieden werden, da sie im Sinne der Elementarisierung nicht anschlussfähig an moderne Orbitaltheorien ist. Ebenfalls auf Grund der Anschlussfähigkeit zu vermeiden ist ein Welle-Teilchen-Dualismus, der zudem nicht fachgerecht ist. Die fachlichen Konzepte werden im Frankfurter Kurs zunächst qualitativ eingeführt und später im Formalismus gedeutet.

Die Vorteile dieses Lehrkonzeptes sind die Nutzung der Optik als ein dem Schüler bekanntes physikalisches Teilgebiet, zudem ist der Spin von Photonen nicht nur quantenphysikalisch relevant, sondern auch über Analogieexperimente mit doppelbrechenden Kristallen und Polarisationsfolien gut mit Schulmitteln darstellbar. Gleichzeitig erlaubt es, die Schüler an modernste Anwendungen und aktuelle Forschung, wie Quantenkryptographiesysteme und -computern heranzuführen. Philosophisch interessante Erörterungen, z.B. zu EPR-Experimenten mit verschränkten Photonen, werden möglich. Durch Analogieexperimente und qualitative Erklärungen wesentlicher Grundbegriffe wird eine Reduktion des symbolischen mathematischen Apparates auf ikonische Analogien und veranschaulichende Darstellungen erreicht. Erst wenn mit deren Hilfe quantenphysikalische Konzepte verstanden sind, findet eine mathematische Formalisierung statt.

Laut MÜLLER et al. (2000) sind die fachlichen und begrifflichen Grundlagen der Quantenphysik sehr schwierig, insbesondere Fragen zur Interpretation sind heikel und erzeugen bei vielen Lehrkräften eine gewisse Unsicherheit. Beispielsweise gestaltet sich die analytische Lösung des Wasserstoffproblems und deren Interpretation als schwierig. Noch schwieriger ist es, dieses Problem für die Schule zu elementarisieren. MÜLLER et al. (2000) sieht die Lösung in paradigmatischen Experimenten, wie das Doppelspaltexperiment, an dem sich

¹ Sie ist klar von der deterministischen, statistischen Unbestimmtheit als Unsicherheit auf Grund der Unkenntnis von Randbedingungen in der klassischen Physik zu trennen.

vielfältige Themen wie Komplementarität und Zustandsreduktion behandeln lassen und selbst eine Neuformulierung von Schrödingers Katze möglich ist. Es lässt sich zudem als selbsttätig durchführbares Simulationsprogramm im Unterricht verwenden. Das Problem der Interpretation wird, wie im Frankfurter Modell, als essenziell angesehen. So ist beispielsweise die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation wenig anschaulich, Deutungsfragen zum Konzept sind wichtig und dürfen nicht vergessen werden, gerade weil dies sonst problematische Vorstellungen hervorruft (Siehe Abschnitt 3.4 sowie MÜLLER und WIESNER, 1997).

Als wesentliche Konzepte behandelt der Kurs von MÜLLER et al. (2000) den Eigenschaftsbegriff von Quantenobjekten, der Präparation und Messung bestimmter Eigenschaften, sowie die Komplementarität und Verschränkung.

Die Behandlung der Genese quantenphysikalischer Begriffe wird in den Unterrichtskonzepten zur Quantenphysik sehr unterschiedlich gehandhabt. So gibt es Konzepte, die vollständig darauf verzichten, aber für CARR und MCKAGAN (2009) beispielsweise ist die Erläuterung aller historischen Phasen für ein umfassendes Verständnis der Quantenphysik notwendig². Das Münchner Konzept gibt keinen expliziten historischen Verlauf an, verwendet aber historische Experimente, beispielsweise zum Hallwachs-Effekt. Auch im Frankfurter Modell wird die historische Dimension implizit über die Diskussion verschiedener philosophischer Positionen aufgenommen, beispielsweise über ein fiktives Streitgespräch zwischen dem altgriechischen Philosophen Parmenides, Kant und eines Quantenphysikers.

Für das zu planende Seminar in der Lehramtsausbildung werden experimentelle Umsetzungen von früheren Gedankenexperimenten und Anwendungen der Quantenphysik als Themen integriert. Dabei werden sowohl Analogexperimente als auch Interaktive Bildschirmexperimente (IBE) genutzt. Es werden unterschiedliche Interpretationen der Quantenphysik vorgestellt, entscheidend ist aber die Herausarbeitung des Unterschieds zwischen Konzepten der klassischen Physik und der Quantenphysik. Wesentlich sind

2 „In period I, comprised of roughly ten years after the formulation of the Schrödinger equation in 1926,3 Heisenberg, Schrödinger, Born, Dirac, von Neumann, and others worked out most of the material we now present in undergraduate courses, including wave mechanics, the matrix formulation, and elementary dynamics. By the end of this time the question of the interpretation of quantum mechanics was dropped by most researchers.

In period II, quantum mechanics was applied in a number of new contexts, from fields to many-body theory, leading to the development of quantum electrodynamics and BCS theory among other triumphs.

Period III begins in 1964 with Bell's Theorem. The question of interpretation was renewed and many theoreticians devised new understandings of quantum mechanics. Still, experimental methods to address such questions were mostly lacking. Then in 1982 Aspect et al. made the first conclusive, widely discussed measurement of Bell's inequalities. This launched period IV of quantum mechanics, which includes quantum information processing and entanglement as a fundamental concept of quantum theory.“(CARR und MCKAGAN, 2009)

dabei die Konzeptgruppen:

- Interferenzfähigkeit, Unbestimmtheit/Komplementarität und Information
- Verschränkung
- Eigenschaftsbegriff, Präparation, Wahrscheinlichkeitsaussagen und Zustandsreduktion/Messung

3.2. Schülervorstellungen

Für die Betrachtung der Schülervorstellungen ist zunächst eine Bestandsaufnahme notwendig:

- Welche Schülervorstellungen gibt es zu diesem Gebiet?
- Stammen sie aus der Lebenswelt der Schüler oder fachorientierten Kontexten?
- Welche Bedeutung haben zentrale Fachwörter für den Schüler?
- Welche Schülerinteressen und Lernbedürfnisse gibt es?
- Sind geeignete Repräsentation zur Begegnung von Präkonzepten vorhanden?

Es gibt eine Vielzahl an Untersuchungen von Schülervorstellungen zur Quantenphysik seit Beginn der 1970er, hauptsächlich für die Oberstufe, wenn auch deutlich weniger als zur klassischen Physik. Sie konzentrieren sich hauptsächlich auf Atomvorstellungen, untersuchen aber auch Photo- und Compton-Effekt, den Franck-Hertz-Versuch und Einzel- und Doppelspaltexperimente. Es gibt Untersuchungen zu abstrakteren Konzepten wie zur Inexistenz permanenter Lokalisierung, Unbestimmtheit, zur Wahrscheinlichkeitsdeutung und zum Eigenschaftsbegriff. Eine sehr umfassende Überblicksdarstellung dazu findet sich bei SCHORN (2014, S.26ff). Zusammenfassend zeigt sich, dass alternative Konzepte, die hauptsächlich aus der klassischen Physik und Alltagsvorstellungen herrühren, stark bei den Schülern dominieren. Auf Grund ihrer Viabilität für den Lerner sind sie stabil, so dass ihre Überwindung als schwierig ist.

SCHORN (2014) führt als Beispiel für die fehlende Überwindung des klassischen Bildes Vorstellungen über das Elektron an: „Die Resultate der Studien dokumentieren beispielsweise, dass in Diskrepanz zu der quantenmechanisch adäquaten Betrachtung eines Elektrons als einem Quantenobjekt, dem sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften zugeschrieben werden können, das sich weder ausschließlich wie ein Teilchen noch ausschließlich wie eine Welle, sondern manchmal wie ein Teilchen und manchmal wie eine Welle verhält, das weder ein Teilchen noch eine Welle ist, das nicht permanent lokalisiert ist und für dessen Bewegung grundsätzlich keine wohldefinierte Bahnkurve angegeben oder auch vorherge-

sagt werden kann, die Vorstellungen der Probanden insbesondere von einem klassischen Teilchenbild eines Elektrons, das zum Teil lediglich gleichzeitig und gleichermaßen um den Wellenaspekt zu einer dualistischen Sichtweise erweitert wird, bestimmt sind.“ Daraus ergeben sich Vorstellungen eines klassischen Punktteilchens mit festen Eigenschaften wie Ladung, Ort und Impuls und dualistischen Mischformen von Teilchen und Welle. Die Ontologie quantenphysikalischer Unbestimmtheit wird nicht erkannt.

MÜLLER (2003b) fasst eine Vielzahl an Monografien zu Schülervorstellungen zusammen. Dabei zeigt sich, dass quantenphysikalische Konzepte in bereits vorhandene, ungeeignete Vorstellungsmuster integriert werden, vielfältige Erklärungsmuster für Phänomene in eng begrenzten Domänen aufgebaut werden, diese Mischformen mit stark mechanistischer Note aber nicht als Problem erkannt werden. „Für Schüler ist die Formulierung ihrer Vorstellungen situationsgebunden, es wird keine einheitliche Vorstellung angestrebt“, so Müller weiter. Es liegt den Atomvorstellungen oft ein klassischer Bahnbegriff zu Grunde, das Teilchenbild wird bevorzugt und damit oft ein Planetenmodell des Atoms, als Bohrsches Atommodell ohne dessen Postulate, mit der Erklärung der Stabilität über Kreisbewegungen der Elektronen und deren Fliehkräfte.

Der Wahrscheinlichkeit wird eine eher umgangssprachliche Bedeutung als Ungenauigkeit oder Zufälligkeit zugeordnet, wo bei sie als Kalkül vom Schüler akzeptiert wird. Es bleibt aber eine Unzufriedenheit, da aus Schülersicht keine kausale Erklärung oder zumindest Beschreibungsmöglichkeit gegeben wird.

Das Photon wird von einem Drittel der Schüler als Teilchen mit Welleneigenschaften gesehen, ansonsten sind oft reine Wellenvorstellungen dominant. Das Elektron wird von zwei Dritteln ebenfalls als Welle gesehen, von einem Drittel aber als klassisches Teilchen. Gegen die Lokalisierung von Teilchen herrschen indifferente Bedenken, welche allerdings zu leicht wieder ausgeräumt werden können.

Die Vorstellungen zur Unbestimmtheit und Unbestimmtheitsrelation sind unklar, so werden Δx und Δp falsch als Abstände vom wahren Wert oder als sehr kleine Größen betrachtet. In der Schülerbefragung von ZOLLMAN (1999) wird zudem deutlich, dass „Schrödingers Katze“ nicht erklärt werden kann und Schüler nur sehr selten etwas über Nichtlokalität und Verschränkung, und damit etwas vom EPR-Paradoxon und der Bell-Ungleichung gehört haben.

Es zeigt sich, dass die hier kurz dargestellten Probleme oft auch Studenten betreffen (MÜLLER und WIESNER, 1997), wie im Abschnitt 3.4 näher erläutert werden wird.

Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass Schülervorstellungen zur Quantenphysik häufig auf Assimilation der neuen Konzepte in das Gedankengebäude der klassischen Physik zurückzuführen sind. Im Seminar wird behandelt, wie diese Fehlvorstellungen erkannt und wie auf diese, auch durch geeignete Medien, reagiert werden kann.

3.3. Ausgewählte Lernumgebungen auf Schulebene

3.3.1. Das Münchner Konzept

Das Münchner Konzept (WIESNER, 2008) berücksichtigt bekannte Lernschwierigkeiten, die sich aus den genannten Schülervorstellungen, aber auch aus der Abstraktheit der Theorie ergeben und bemüht sich besonders um die Klärung begrifflicher Aspekte. Zentrale Themen des Lehrgangs sind:

- Wahrscheinlichkeiten in der Quantenmechanik
- Dynamische Eigenschaften und ihre Präparation, vermittelt über klassische Analogieexperimente
- Messungen in der Quantenmechanik als Zustandsreduktion
- Unbestimmtheit und Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation
- Anwendungen quantenphysikalischer Prinzipien im Doppelspaltexperiment
- Auseinandersetzung mit dem Bohrschen Atommodell
- Hinführung zur Schrödingergleichung und Operatortheorie
- Vereinfachte Darstellung des Wasserstoffproblems über ein Kastenpotenzial

Eine Vereinfachung wird durch geeignete Begriffe wie „Präparation“ und „dynamische Eigenschaft“ und der konsequenten Nutzung der Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation unter Vermeidung eines Welle-Teilchen-Dualismus erreicht. Die Grenzen des Bohrschen Atommodells werden verdeutlicht und durch ein angemessenes quantenphysikalisches Orbitalmodell ersetzt. Auf Grund der Schwierigkeit rein quantenphysikalische Experimente durchzuführen, werden viele Simulationsprogramme, beispielsweise das Mach-Zehnder-Interferometer als Quantenradierer oder das Doppelspaltexperiment mit Einzelphotonen sowie IBE genutzt. Zur Wiederholung und Festigung sind diese Themen in einem Spiralcurriculum angeordnet, zunächst werden sie für Photonen und dann für die Elektronen als Quantenobjekte durchlaufen. Dadurch soll vermieden werden, dass Schüler die Quantenobjekte Photonen und Elektronen als prinzipiell verschiedene Objekte auffassen.

Für die Evaluation des Kurses sollten die Teilnehmer fachliche Aussagen aus der Quantenphysik mit Hilfe einer fünfstufigen Likert-Skala beurteilen. Dieses Instrument findet modifiziert auch in dieser Arbeit Anwendung. Hinzu kamen bei Müller freie Antwortmöglichkeiten zu Unbestimmtheitsrelation und Atomvorstellungen, sowie Interviews zum Lernerfolg und Schülervorstellungen. Nach Besuch des Unterrichtsganges zeigt sich ein überwiegend positives Ergebnis. Die teilnehmenden Schüler stimmen der Nichtexistenz von Eigenschaften im quantenphysikalischen Sinne überwiegend zu, die Sonnensystem-Struktur des Atoms wurde hingegen nahezu, genauso wie der Determinismus des Ortes, vollständig

abgelehnt. Bei der Energiequantisierung zeigten sich jedoch konzeptionelle Schwierigkeiten. Das seit 2001 bestehende Lehrerausbildungskonzept Milq (siehe Abschnitt 3.5.1) wurde 2010 um eine Unterrichtseinheit im Blended Learning-Design³ zur Quantenphysik für die Sekundarstufe 2 – SPQR – erweitert (DAMMASCHKE et al., 2010). Sie enthält E-Learning-Einheiten als Einzel- oder Partnerarbeit mit abschließender Präsentations- und Plenumsphase und fokussiert auf die selbständige Bearbeitung im Sinne eines gemäßigten Konstruktivismus.

Der Aufbau in flexibler Modulbauweise orientiert sich inhaltlich am qualitativen Basiskurs der Lehrerfortbildung Milq, stellt aber eine Erweiterung als konkrete Umsetzung für den Unterricht dar, wobei unterrichtspraktische Vorgaben aus dem Kerncurriculum⁴ und den Einheitlichen Prüfungsanforderungen für das Abitur (EPA)(KMK, 2004) berücksichtigt werden. Durch die Modularisierung ist der Kurs flexibel an länderspezifische oder schuleigene Anforderungen anpassbar. Die drei Module behandeln Elektronen und Photonen als Quantenobjekte, die Quanteninterferenz am Doppelspalt und Mach-Zehnder-Interferometer und das Thema der Welcher-Weg-Information zusammen mit den Besonderheiten des quantenphysikalischen Messprozesses.

Die strukturierten, eigenständig entwickelten Onlineaufgaben mit EPA-Operatoren in Partnerarbeit sowie Gruppendiskussion für die Plenumsphase eignen sich besonders zur Verbesserung der Fachsprache und -kommunikation. Der Kurs enthält zudem als Hilfestellungen Simulationen, Merkttexte, Zusammenfassungen, gestufte Hilfen und allgemeine Lösungsvorschläge, sowie Advance Organizer⁵. Hinzu kommen metakognitive Aufgabentypen, wie die Wissensstrukturierung mit Concept Maps⁶, die in Portfolios gesammelt werden. Wissenstests runden die Lektionen ab. In der Gruppenphase werden die Ergebnisse vorgestellt und weiterführende Themen und Aufgaben behandelt, sowie Realexperimente durchgeführt.

3.3.2. Das Frankfurter Konzept

Das Frankfurter Konzept nach POSPIECH (2004) wählt den Einstieg in die Quantenphysik über die Optik. Neben der physikalischen Erklärung grundlegender, auch moderner, experimenteller Ergebnisse fokussiert der Lehrgang auf einen philosophischen Dialog, insbesondere auf das Zusammenwirken der Analyse beider Fachgebiete als „Rückwirkung

³ „Blended Learning ist ein integriertes Lernkonzept, das die heute verfügbaren Möglichkeiten der Vernetzung über Internet oder Intranet in Verbindung mit ‚klassischen‘ Lernmethoden und -medien in einem sinnvollen Lernarrangement optimal nutzt. Es ermöglicht Lernen, Kommunizieren, Informieren und Wissensmanagement, losgelöst von Ort und Zeit in Kombination mit Erfahrungsaustausch, Rollenspiel und persönlichen Begegnungen im klassischen Präsenztraining“ (SAUTER et al., 2004, S.68)

⁴ Es findet vor allem das niedersächsische Kerncurriculum Anwendung.

⁵ Werkzeuge zur Hinführung zum folgenden Wissensgebiet und Aktivierung des Vorwissens (genauer bei AUSUBEL, 1960)

⁶ siehe 11.2.3 für Def. und Erläuterungen

empirischer Gegebenheiten auf die philosophische Deutung der Welt“. Es wird versucht an das Schülervorwissen anzuknüpfen. Die Quantenphysik entspricht wenig den Alltagserfahrungen, sondern ist ihnen vielmehr vollkommen konträr. Ein möglicher Anknüpfungspunkt ist gerade die Begrenztheit einer Verbindung aufzuzeigen und damit eine Diskussion über Modelle und deren Interpretationen in der Physik zu ermöglichen. Dadurch kann auch das Bedürfnis der Schüler nach Klärung des Weltbildes in den Lehrgang integriert werden. Damit leistet dieser einen wichtigen Beitrag zur Erklärung über die Natur der Naturwissenschaften (NOS). Hinzu kommen als Elementarisierungen zunächst qualitative Erklärungen experimenteller Ergebnisse und einfache, vom Schüler selbst durchführbare Analogieexperimente, welche Lust auf exaktere mathematischen Modellierung wecken sollen. Insgesamt setzt dieser Unterrichtsgang auf eine starke Forcierung eines kognitiven Konfliktes nach dem Conceptual Change, um die beschriebenen Schülervorstellungen überwinden zu können.

Der Kurs, siehe Abbildung 3.2, besteht aus Pflicht- und Kürmodulen, erstere (Modul 1

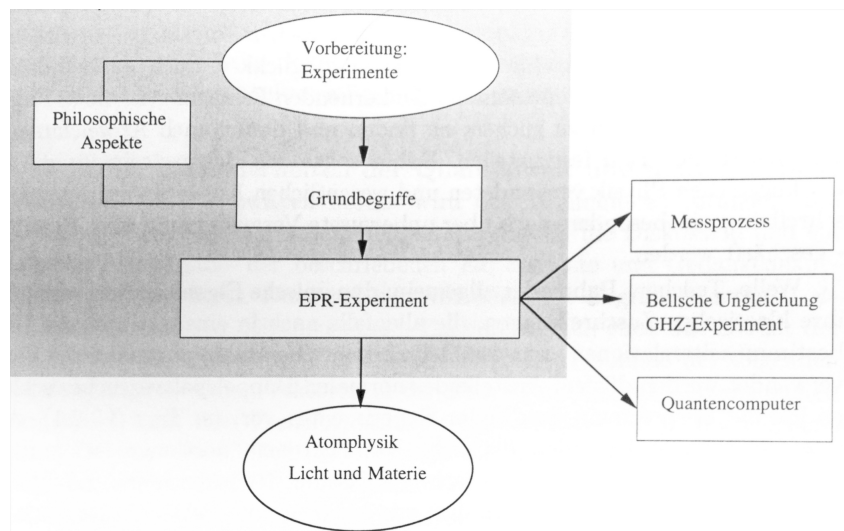


Abbildung 3.2.: Lehrgang des Frankfurter Modells POSPIECH (2004), die Pflichtmodule sind grau unterlegt.

bis 3) bauen aufeinander auf, die zusätzlichen Komponenten sind unabhängig voneinander. Im ersten Schritt wird der Verlust klassischer Zuschreibung dynamischer Eigenschaften in erklärenden Experimenten wie dem Taylorversuch als Doppelspaltexperiment und veranschaulichenden Polarisationsexperimenten zum Spin erläutert.

Als zweiter Schritt folgt in dem vorgestellten Kurs die Einführung eines Minimums an mathematische und formalen Begriffen wie Zustand, Eigenzustände und -werte, Tensorprodukte, Diphoton, Wahrscheinlichkeit, Unbestimmtheit und Superposition und schließlich Spinmatrizen. Diese Begriffe mögen schwierig erscheinen, werden aber als Manipulation von in der Oberstufe wohlbekannten, zweidimensionalen Vektoren dargestellt und über die

Besprechung psychologischer Bilder und Klärung zugehöriger philosophischer Aspekte, z.B. über Dialoge zu Realität und ihrer Erkennbarkeit, vereinfacht.

Als Drittes tritt die Erläuterung des Einstein-Podolsky-Rosen (EPR)-Experimentes als quantenphysikalisches Experiment zur Nichtexistenz von Eigenschaften als „Herz der Quantenphysik“ hinzu, das durch Präsentation von Originalarbeiten, z.B. der Darstellung der Einstein-Bohr-Debatte, gut qualitativ veranschaulicht ist und neben der historischen Entwicklung ebenfalls eine philosophische Erörterung dieses neuen Weltbildes ermöglicht. Gleichzeitig gewähren weiterführende Experimente, beispielsweise zu GHZ-Zuständen, Einblick in aktuelle Forschung. Interessant ist hierbei die experimentelle Entscheidbarkeit einer philosophischen Frage über die Bellsche Ungleichung als „experimentelle Philosophie“. In den letzten drei, optionalen Kapiteln des Lehrganges wird der Messprozess genauer erläutert und über Experimente, wie dem Quantenradierer, beschrieben. Außerdem werden technologische Anwendungen wie der Quantencomputer und die Quantenkryptographie näher ausgeführt, wodurch die Unbestimmtheit und Verschränkung vertieft werden können. Der dritte Teil findet den Anschluss zum nächsten Lehrplangebiet der Atomphysik.

3.3.3. Das Dirac-Konzept von Micheli

Eng mit dem Frankfurter Modell verwandt ist das Dirac-Konzept nach MICHELINI et al. (2014) mit einer ähnlichen Vorgehensweise. Es fokussiert besonders darauf, keinen fortgeschrittenen mathematischen und physikalischen Hintergrund zu benötigen und veranschaulicht einfache Zwei-Zustand-Systeme mittels linearer Polarisierung von Photonen mit Polarisationsfolien und doppelbrechenden Kristallen, wodurch das Verhältnis physikalischer Observablen und linearer Operatoren im konzeptuellen wie formalen Sinne geklärt werden kann. BATTAGLIA et al. (2010, S.107) fasst den Dirac-Ansatz folgendermaßen zusammen: „This proposal aims at introducing the concept of state and the superposition principle as key points of the theory and the basic elements of the formal representation of states and operators in vector spaces.“ Es besteht aus einfachen Experimenten, die beim Schüler ein Bewusstsein für die zugehörigen theoretischen Annahmen und damit der konzeptuellen Rolle der Theorie fördern sollen. Wesentlicher Aspekt ist die Vermittlung eines physikalischen Basiswissens zur Quantenphysik mit Interpretationen und phänomenologischen Analogien. Dabei wird auf eine hohe Schüleraktivierung mit vielfältigen Hands-on-Experimenten geachtet.

Der Kurs beginnt mit der Polarisierung als Eigenschaft von Photonen über Experimente mit Polarisationsfiltern und doppelbrechenden Kristallen. Es folgt die Klärung der Wahrscheinlichkeitsinterpretation quantenphysikalischer Messungen an Hand von Einzelphotonen und dynamischer Eigenschaften von Quantensystemen über die Photonen-Polarisierung. Danach wird die Mischung reiner Zustände über die Superposition mit 45 Grad polarisierten Photonenzuständen betrachtet, wodurch auch die Nichtexistenz eines Eigenschaftsbegriffs

geklärt werden kann. Daran schließt sich die formale Repräsentation des Superpositionsprinzips an, speziell von Zwei-Zustandssystemen über das Gesetz von Malus. Observablen, repräsentiert durch lineare Operatoren, werden dann mit Polarisatorexperimenten veranschaulicht. Es folgt die Generalisierung des Formalismus und der Übergang zu diskreten Observablen, wie den Energieniveaus in Atomen. Am Ende steht ein Kapitel über Nichtlokalität, EPR-artige Experimente und Verschränkung. Alle Experimente sind an die Aufmerksamkeit der Schüler angepasst und als Präsentation wichtiger Konzepte entlang eines didaktischen Pfades angeordnet, welchen Sie in Abbildung 3.3 sehen. Unter den

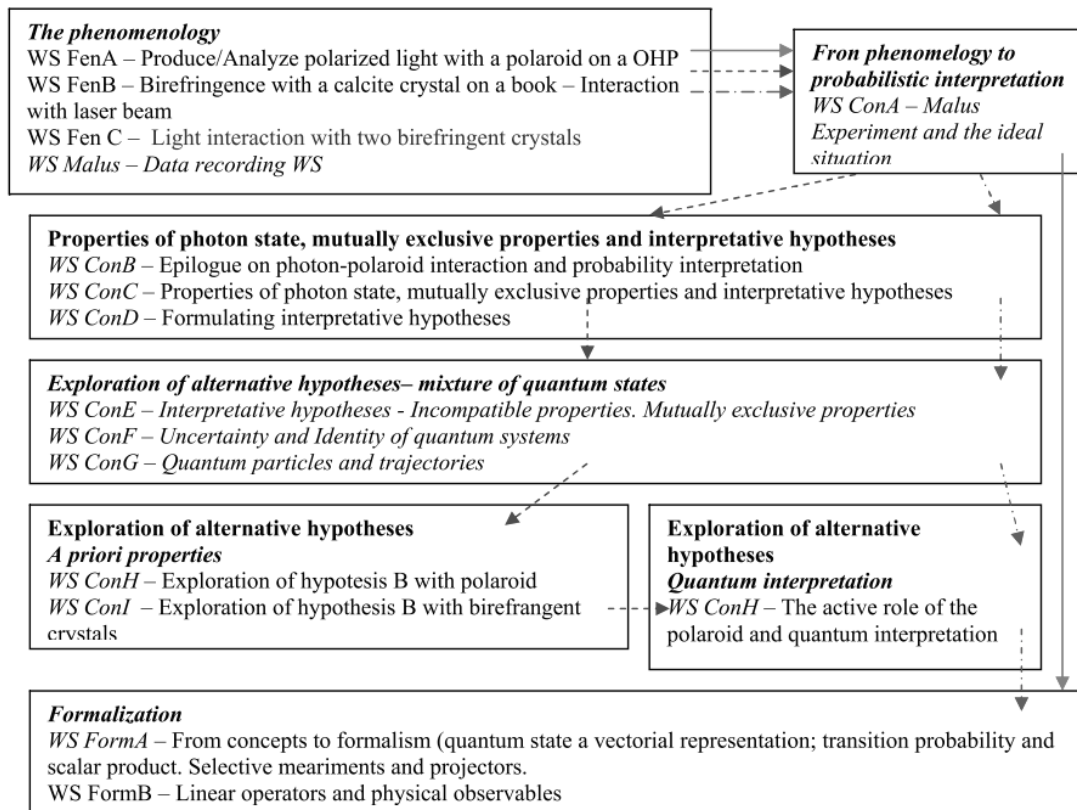


Abbildung 3.3.: Module des Dirackonzeptes nach MICELINI et al. (2007)

Experimentieraktivitäten befinden sich auch Computersimulation mit der Darstellung idealer Experimente zur Entdeckung und Konstruktion von neuen Konzepten und Ideen. Hinzu kommen verschiedene Arbeitsblätter zur Unterstützung der Modularisierung der Lernwege, welche sehr ähnlich der didaktischen Rekonstruktion strukturiert sind. Sie lassen sich in drei Arten einteilen:

phänomenologisch Schülerexperimente zur Lichtpolarisation und zugehöriger Gesetzmäßigkeiten

konzeptuell Untersuchung des Konzepts des quantenphysikalischen Zustandes über ver-

schiedene, vom Schüler vermutete Hypothesen und deren Konsequenzen

formal Mathematischer Repräsentation von Zuständen und Observablen

Die ein- bis zweiseitigen Arbeitsblätter sind in einzelne kleine Schritte unterteilt und lassen sich in freier Einzel- und Gruppenarbeit bearbeiten, wobei eine Orientierung in der Einzelarbeit und der Vergleich von Ideen in der Gruppe erfolgt. Konzepte werden durch dieses Explizit-machen der Ideen vertieft. In ihnen wird besonders Wert auf die Kontextualisierung der Experimentiersituationen, Hypothesenbildung der Schüler, eigenständige Durchführung der Experimente und der Vergleich mit den eigenen Vorhersagen und Verallgemeinerung der Resultate gelegt. Dadurch können die Kompetenzen der Schüler im Bereich NOS erweitert werden, gleichzeitig dienen die Arbeitsblätter aber auch als Diagnosewerkzeug für den Lehrer, um Lernwege und mögliche Verständnisprobleme zu identifizieren.

Die Abbildung 3.3 zeigt die drei möglichen Wege diesen didaktischen Pfad zu gehen: Der kürzeste läuft über die Konzepte zur Polarisierung, Malus-Gesetz und der Verbindung zur Wahrscheinlichkeitsinterpretation direkt zum Formalismus (durchgezogene Linie). Im zweiten wird die Wahrscheinlichkeitsinterpretation mit quantenmechanischen Zuständen, Präparation und Messung, gegenseitig ausschließender Eigenschaften, orthogonaler Zustände und Superposition von Zuständen in Verbindung gebracht und verschiedene Interpretationsmöglichkeiten wie klassische, verbogene Parameter oder quantenphysikalische Interpretationen der Superposition von Zuständen diskutiert, eigene Hypothesen über dafür vorgesehene Experimente getestet und schließlich wieder eine formal-mathematische Repräsentation von Zuständen, sowie die Rolle der Linearität bei der Superposition, die Rolle des Skalarproduktes für Übergangswahrscheinlichkeiten, nichtklassisches Verhalten bei der quantenphysikalischen Interferenz, lineare Operatoren und Observablen, Projektion und selektive Messungen erläutert (Punkt-Strich-Pfad). Der ausführlichste gepunktete Pfad enthält zusätzlich noch die Diskussion von a-priori-Eigenschaften von Quantenobjekten und damit verborgener Parameter.

Eine Besonderheit des Dirac-Konzeptes ist die vielfältige Nutzung ikonischer Repräsentation, wie sie beispielhaft in Abbildung 3.4 zu sehen ist. Sie hilft bei der Elaboration der Konzepte und Entdeckung von Ideen, Beschreibung und Interpretation, wie MICHELINI et al. (2000, S.420) erläutert: „The iconographic representation helps the elaboration of the concepts and the exploration of ideas, even though it must not be forgotten that, besides the description of the phenomena, it also implies their interpretation.“ Der Kurs konnte positiv evaluiert werden, da 60 % der Studenten sich fähig zeigten quantenphysikalische Konzepte wie Zustand, Inkompatibilität konjugierter Eigenschaften, Nichtlokalität und Indeterminismus zu verstehen und zu erläutern.

Im Seminar werden schüleraktive, optische Analogexperimente, z.B. zu Zwei-Zustands-Systemen, vorgestellt. Hinzu kommt die Untersuchung quantenphysikalischer Prinzipien

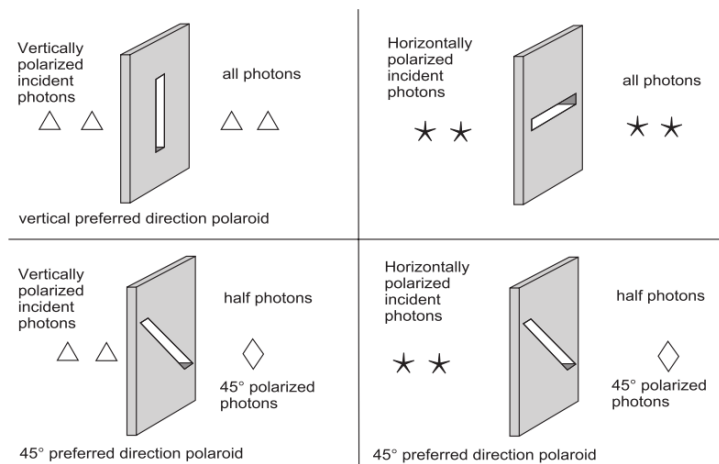


Abbildung 3.4.: Beispiel für ikonische Repräsentation nach MICHELINI et al. (2000, S.409)

bei der Betrachtung des Doppelspaltexperimentes für Photonen wie Elektronen. Beides verdeutlicht, dass Eigenschaften von Quantenobjekten dynamisch und erst nach Präparation vorhanden sind. Ebenfalls wird dies bei der Darstellung des EPR-Experimentes und speziell von GHZ-Zuständen deutlich. Als Anwendungen werden die Quantenkryptographie und der Quantencomputer und ihre Darstellung im Schulunterricht behandelt. Das Bohrsche Atommodell und seine Bedeutung für die Schule wird Gegenstand der Diskussion sein. Schließlich werden psychologische Bilder zur Veranschaulichung quantenphysikalischer Konzepte besprochen.

3.4. Vorstellung von Studenten zum Thema Quantenphysik

MÜLLER und WIESNER (1997) betont für die Quantenphysikausbildung: „Eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Vermittlung der zentralen Inhalte liegt dabei auf Seiten der Lehrer.“ Sie untersuchten Verständnisprobleme von Studenten mit Hilfe von Interviews über die Deutung von Konzepten der Quantenphysik und wollten damit Aufschluss darüber gewinnen, ob die Ausbildung an der Universität ausreichend schulbezogen ist. Neben anderen Konzepten wie die Unbestimmtheitsrelation, der Wahrscheinlichkeitsinterpretation oder der Deutung Photonenvorstellung, beispielsweise im Doppelspaltexperiment, zeigten Lehramtsstudenten bei der Atomvorstellung neben der fachlich anerkannten Orbitalvorstellung häufiger ein reines Bohrsche Atommodell oder eines mit aufgesetzter Wahrscheinlichkeitsinterpretation, oft aber auch Vorstellungen von einer um das Atom angeordneten Elektronenwolke. Die Vorstellung diskreter Bahnen scheint außerordentlich stabil zu sein, da quantenmechanische Modifikationen häufig auf dieses aufgesetzt werden.

Bei der Lokalisierung von Elektronen wird häufig ihre hohe Geschwindigkeit als Grund für ihre schwierige Ortsbestimmung genannt. Oft wird ihr Ort auch einfach als fest, aber unbekannt angenommen oder es wird davon ausgegangen, dass dieser auf Grund fehlender Anfangsbedingungen kein Rückschluss auf die Bahn eines Teilchens ermöglicht. Häufig ist auch die Vorstellung anzutreffen, dass Elektronen eine feste Ortseigenschaft besitzen, diese nur als statistische Wahrscheinlichkeit bezifferbar ist (klassische statistische Ungenauigkeit).

Zusammenfassend stellen die Autoren fest, „daß in der überwiegenden Zahl der Fälle klassische Vorstellungen statt der korrekten quantenmechanischen dominieren“. Auffällig ist der Rückgriff auf Schulwissen, die Universität vermag es nicht, ein quantenmechanisch adäquates Bild zu vermitteln, welches aber für die Planung eines geeigneten Unterrichtsganges notwendig wäre.

KARAKOSTAS und HADZIDAKI (2005, S.1f) sehen bei Studenten eine seltsame Mischung aus klassischen und quantenphysikalischen Konzepten, oft wird die Quantenphysik aus klassischer Perspektive⁷ wahrgenommenen. So werden makroskopische Eigenschaften auf submikroskopische Objekte, aber auch das klassisch deterministische Denken unkritisch auf die Quantenmechanik übertragen. Problematisch ist außerdem der unkritische Umgang mit der Vorläufigkeit von Modellen in der Physik, insbesondere beim Bohrschen Atommodell (KALKANIS et al., 2003, S.265f). Bei den Konzepten ist somit eine stabilisierende Assimilation neuer Ideen in das vorhandene Wissensnetz statt notwendiger Akkommodation vorhandenen Wissens zu beobachten.

Zusammenfassend zeigen sich folgende problematische Vorstellungen von Studenten, die auch neben den erläuterten Studien zusätzlich von ROBERTSON und KOHNLE (2010) und WITTMANN et al. (2005) bestätigt werden:

1. Formales Rechnen von Übungsaufgaben ohne mentales Konzept
2. Beibehaltung einer klassischen Perspektive (Trajektorien, Welle-Teilchen-Dualismus, feste Eigenschaften von physikalischen Größen, Unbestimmtheit als Messfehler)⁸
3. Nichtanerkennung des Indeterminismus der Quantenphysik
4. Falsche Vorstellungen über den Messprozess

Sie untersuchten Verständnisprobleme von Studenten mit Hilfe von Interviews über die Deutung von Konzepten der Quantenphysik und wollten damit Aufschluss darüber gewinnen, ob die Ausbildung an der Universität ausreichend schulbezogen ist. Neben anderen

⁷ Die klassische Physik ist nach Darstellung der Autoren atomistisch, reduktionistisch, separabel; Messungen sind passiv und mögliche und tatsächliche Existenz sind ein und dasselbe.

⁸ Bbeispielsweise zeigten Lehramtsstudenten bei der Atomvorstellung neben der fachlich anerkannten Orbitalvorstellung häufig ein reines Bohrsche Atommodell oder eines mit aufgesetzter Wahrscheinlichkeitsinterpretation, oft aber auch Vorstellungen von einer um das Atom angeordneten Elektronenwolke. Die Vorstellung diskreter Bahnen scheint außerordentlich stabil zu sein, da quantenmechanische Modifikationen häufig auf dieses aufgesetzt werden.

Tabelle 3.1.: Vier häufige Interpretationen der Quantenphysik geordnet nach drei Schlüsselthemen, zusammengefasst und übersetzt nach (BAILY und FINKELSTEIN, 2010a, S.3 und 5)

Interpretation	Verst. Variablen	Information/Materie	Kollaps Wellenfkt.
realistisch/statistisch ⁹	ja/agnostisch	Information ¹⁰	Wissen
Kopenhagener Deutung ¹¹	nein	Information	physikalisch
Materiewelle	nein	Materie	physikalisch
Führungswelle ¹²	ja	Materie	Wissen
agnostisch ¹³	agnostisch	agnostisch	agnostisch
gemischt ¹⁴	ja/nein	Materie/Informationen	indifferent

Konzepten wie die Unbestimmtheitsrelation, der Wahrscheinlichkeitsinterpretation oder der Deutung Photonen vorstellung, beispielsweise im Doppelspaltexperiment,

Die Vielfalt der studentischen Vorstellungen zeigt sich auch bei den Interpretationen der Quantenphysik, wie Tabelle 3.1 zeigt. In ihr sind die in der Untersuchung der studentischen Vorstellung vorkommenden Interpretationen in der ersten Spalte dargestellt, es folgen charakterisierende Schlüsselthemen, ob dem Modell implizit versteckte Variablen zugeordnet werden, die Annahme der Wellenfunktion als mathematisches Konstrukt, zur Kodierung von Wahrscheinlichkeitsdichten und damit Informationen oder als physikalisch-reale Materiewellen und ob der Kollaps der Wellenfunktion einen physikalischen Vorgang oder vielmehr Änderung des Beobachterwissens beschreibt.

KARAKOSTAS und HADZIDAKI (2005) sieht die initiale ontologische Kategorisierung als entscheidend für die Aneignung neuen Wissens und das Auftreten von Misskonzepten an. Durch Explizit-Machen ontologischer und konzeptueller Annahmen, die der jeweiligen theoretischen Struktur unterliegen, ließe sich der Übergang im Sinne des Conceptual Change deutlich verbessern. In diesem Punkt deckt sich dieses Konzept mit den Schulkonzepten des Münchner und Frankfurter Modells.

Lehramtsstudenten sind formal-theoretisch gut ausgebildet, aber in konzeptioneller Hinsicht besitzen sie ähnliche Fehlvorstellungen wie ihre (zukünftigen) Schüler. Im

⁹ Von mehr als der Hälfte der Studenten (BAILY und FINKELSTEIN, 2010b) bevorzugt, mit allerdings großer Unsicherheit bei der Beurteilung des eigenen Wissens.

¹⁰ auf Ensemble bezogen, nicht auf einzelne Quanten

¹¹ Ablehnung über unbeobachtbare Prozesse zu spekulieren, von den meisten Physikern favorisiert

¹² starke Verbindung zum Wellen-Teilchen-Dualismus

¹³ keine Interpretation, eher Konzentration auf den Formalismus

¹⁴ Studenten unterscheiden explizit zwischen dem was für sie intuitiv richtig ist (realistische Perspektive) und was sie für die physikalisch angemessene Antwort halten (Quantenperspektive)

Fokus des Seminars sollte daher die Behandlung der konzeptionellen Grundideen stehen.

3.5. Beispiele für die hochschuldidaktische Strukturierung des Themas Quantenphysik

3.5.1. Milq – Münchener Internet-Projekt zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik

Das Münchener Internet-Projekt zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik baut unterrichtsnah auf dem Münchner Konzept zur Quantenphysik auf. In den 13 Lektionen umfassenden Kurs wird besonders Wert auf die begriffliche Klärung und das qualitative Verständnis quantenphysikalischer Konzepte gelegt.

Der qualitative Basiskurs umfasst sieben Kapitel und behandelt die Präparation von Photonen und Elektronen als Welle und Teilchen, statistische Aussagen der Quantenphysik, die Besonderheiten des Messprozess und die Unbestimmtheit.

An diesem Basiskurs kann sich ein quantitativer Aufbaukurs mit acht Kapiteln anschließen, der zum mathematischen Formalismus über die Schrödingergleichung hinführt, diese eng verbunden mit Potenzialen und Tunneleffekt als Anwendung verdeutlicht und schließlich das Wasserstoffatom behandelt. Zusätzlich werden vertiefend der Photoeffekt, die Elektronenbeugung, Quanteninterferenzen, der Messprozess und die Unbestimmtheitsrelation bearbeitet.

Als dritte Säule sind Spezialgebiete als Wahlthemen vorhanden. Moderne Themen wie Quantenkryptografie, Quanteninformationstheorie und Quantenteleportation, aber auch eher fachdidaktische Ansätze wie Quantenspiele, Aufsätze über Schülervorstellungen oder Zeigerformalismus können gewählt werden. Die kleinen überschaubaren Lektionen besitzen

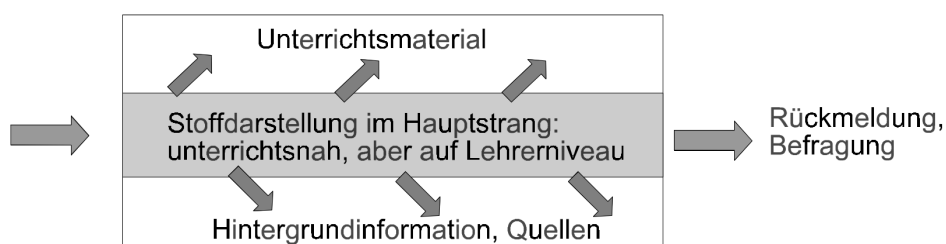


Abbildung 3.5.: Struktur der Lektionen im Lehrer-Online-Kurs zur Quantenphysik milq

einen begrenzten Themenumfang und klare Struktur, so dass eine Überforderung, die leicht bei Online-Lerneinheiten möglich ist, vermieden wird. Dazu liegen die Lehrtext

auch begleitend als Skript zum Ausdruck bereit. Die Führung durch die Texte ist linear angelegt, wobei es zwei Arten von Zusatzinformationen, wie in Abb. 3.5 zu sehen, gibt: Zum einen Hinweise für den Unterricht, wie didaktische Fragen, Aufgaben und Arbeitsblätter als auch Hintergrundinformationen mit mathematischen Ableitungen und tiefergehende Begründungen.

Das Milq-Konzept ähnelt damit stark dem Münchner Konzept, aus dem es hervorgegangen ist, zeigt aber auch Erweiterungen für den hochschuldidaktischen Bereich:

1. Es werden vielfältige Hintergrundinformationen zu Lehrplanthemen, wie Problemen bei der Einführung des Photoeffekts und der Photonhypothese, Einzelspaltableitungen der Unbestimmtheitsrelation und Energie-Zeit-Unbestimmtheit gegeben.
2. Es werden verstärkt Themen aus der aktuellen Diskussion wie Rydberg-Atome, Quantencomputer oder Greenberger-Horne-Zeilinger-Korrelationen behandelt.
3. Deutungsfragen zur Kopenhagener oder Viele-Welten-Interpretation, Bohr-Einstein-Debatte, statistische Deutung, aber auch EPR-Paradoxon, Bellsche Ungleichung oder verborgene Parameter werden vertieft.
4. Es wird ein Überblick für ausgearbeitete schulische Unterrichtsgänge gegeben (siehe Schülerprogramm zur Quantenreflexion (SPQR) im Münchner Konzept Abschn. 3.3.1).

Wesentliche Ziele sind die Darstellung von Interpretationsfragen als Dreh- und Angelpunkt der Quantenphysik, eine klare Abgrenzung zur klassischen Physik wie auch im Frankfurter Modell und Dirackonzept, vor allem zur Vermeidung von Fehlvorstellungen von Schülern und Studenten, das schließt die Auslassung des Bohrschen Atommodells, die Definition klarer Begriffe, wie die konsequente Nutzung der Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation unter Vermeidung eines jeglichen Welle-Teilchen-Dualismus, sowie einer klaren Darstellung des Messprozesses ein.

Der gesamte Kurs ist im DBR-Design gehalten und umfasst neben dem Lehrgang selbst Begleituntersuchungen zur iterativen Verbesserung des Unterrichtsvorschlages.

3.5.2. Das Diracmodell in der Lehramtsaus- und -fortbildung

Ein weiteres hochschuldidaktisches Konzept ist ebenfalls eine Erweiterung eines Schulmodells - dem Dirackonzept - und legt besonderen Wert auf die Überwindung von Präkonzepten bei Lehrern und der Integration von fachlichem und fachdidaktischen Wissen durch praktische Anleitung zur Erstellung eines eigenen fachdidaktischen Vorschlags zur Vermittlung der Quantenphysik. Auch hier wird wie im vorhergehenden Modell zunächst das konzeptuelle Verständnis weitestgehend qualitativ und später auf den mathematischen Formalismus aufgebaut. Zur Erreichung dieser Ziele kooperieren 15 italienische

Universitäten, um ein umfassendes Konzept - IDIFO¹⁵ - sowohl für Schüler, als auch Lehramtsstudenten und praktizierende Lehrer zu erstellen.

Nach BATTAGLIA et al. (2010, S.106) verstärken zwei Aspekte die Probleme in der Lehramtsausbildung in moderner Physik: „the lack of specific knowledge of the topic of many teachers; the initial idea of teachers concerning quantum physics in secondary school, mainly related to historical approaches or unsolved interpretative phenomena. In the Master IDIFO the Dirac approach to quantum mechanics was discussed with teachers starting from an educational proposal for secondary school.“

In MICHELINI und STEFANEL (2009) wird ein Weiterbildungskonzept für Lehrer als Blended-Learning-Umgebung beschrieben. Grundlage der Fortbildung ist der Dirac-Ansatz (Kap. 3.3.3) als Online-Kurs, hinzu kommen Online-Diskussionen über den Ansatz mit zugehörigen Übungen. Das Dirac-Konzept wird in einem Präsenzseminar über Hintergründe, kritische Punkte des Referenzrahmens und Vergleich mit anderen Konzepten vertieft. Dabei dienen Experimente aus dem Schulmodell von MICHELINI et al. (2014) mit doppelbrechenden Kristallen und Polarisatoren, welche in Sekundarschulen und Lehramtsausbildung bereits getestet wurden, als Trainingsmaterial. Diese Vorbereitungen sind Voraussetzungen für die Bearbeitung eines didaktischen Onlinelaboratoriums zur Entwicklung und Prüfung von Mikromodulen und schließlich eines eigenen, kohärenten Unterrichtsvorschlages basierend auf dem Dirac-Ansatz. Eine anschließende Präsenz-Diskussion erforscht mögliche Problemstellen der Unterrichtsvorschläge in simulierter Interaktion mit Schülern. Als Abschluss werden weiterführende konzeptuelle und pädagogische Themen der Quantenphysik in Präsenz diskutiert. Folgende Kompetenzbereiche sollen durch diesen Ansatz besonders gefördert werden:

- Kommunikation, Erkenntnisgewinnung und Argumentieren
- Problemlösen
- Mathematisieren und Modellbearbeitung in der Physik
- selbständiges Experimentieren und Datenauswerten

Der IDIFO-Masterkurs zeigt laut BATTAGLIA et al. (2010, S.113ff) Erfolge bei der Verbesserung des konzeptuellen Verständnisses der Teilnehmer: „Also it is seen that the uncertainty principle is quoted in 6 cases, while in the initial survey it was definitely more quoted. In the final survey more attention is paid to measurement theory, to the incompatibility concept, to the concept of state. With respect to the reference proposal, it emerges that less attention is given to the knot of quantum particles and trajectories, to the identity of quantum particles, and the role of quantum interference.“ Als zweites Ergebnis konnten wichtige Konzepte der Quantenphysik durch ein Ranking der Lehreraussagen ermittelt werden:

15 Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

1. Quanten und Quantisierung
2. Heisenbergsche Unbestimmtheit
3. Welle-Teilchen-Dualismus
4. Atomphysik
5. Photo- und Compton-Effekt
6. Doppelspaltexperiment

Weitere wichtige Konzepte, wie Zustands- und Wahrscheinlichkeitsbeschreibung, der Messprozess oder Superpositionsprinzip, wurden zunächst oft vergessen, aber bei der Charakterisierung der Quantenphysik gegenüber der klassischen Physik von Lehrern genannt. Dies sind erste qualitative Hinweise auf eine Verbesserung des konzeptionellen Verständnisses der Teilnehmer, bedarf aber natürlich noch einer genaueren Untersuchung.

3.5.3. Das Instruktionsmodell von Kalkanis

Zur Auflösung problematischer Vorstellungen entwickelt das Instruktionsmodell von KALKANIS et al. (2003) ein Konzept, wie in der Quantenphysikausbildung von Lehrämtern die Komponente des fachdidaktischen Wissens (PCK) besser berücksichtigt werden kann. Dafür werden bei KALKANIS et al. folgenden Punkte als wesentlich erachtet:

1. Das studentische Vorverständnis, insbesondere lernhinderliche Fehlkonzepte und ihre Mikrostruktur, müssen genau wie die Präkonzepte der Schüler Beachtung bei der Vermittlung finden, aber vor allem vom Studenten selbst erkannt werden, da sonst eine Analyse fremder Fehlkonzepte, wie die der Schüler, kaum möglich erscheint. Dazu werden geeignete Repräsentationen bereitgestellt, um einen kognitiven Konflikt auszulösen.
2. Eine fachliche Klärung als hermeneutischer Prozess wird genutzt, um die wesentlichen Konzepte unter Berücksichtigung typischer Misskonzepte von Studenten zu bestimmen. Dazu dient in der vorliegenden Arbeit ein Teil der Anforderungsanalyse in Kapitel II.
3. Der dritte Punkt dient schließlich der Aufdeckung der Lernbedürfnisse jedes einzelnen Lernenden, wofür Lehrwerkzeuge zum Conceptual Change gefunden werden müssen, wobei aber deutlich von klassisch-mechanischen Analogien abgeraten wird, da dieses das deterministische Denken der Studenten nur befördern würden. Auch Alltagsvorstellungen sind ungünstig, da deren Bilder zu unerwünschten synthetischen Modellen führen. Eine Lösung stellt eine Behandlung über die Optik und die Verwendung weit von den physikalischen Alltagsvorstellungen entfernte, psychologische Bilder wie beispielsweise im Frankfurter Modell (POSPIECH, 2000) dar.

4. Geeignete Instruktionen müssen gefunden werden, die eine Förderung der Wissensrekonstruktion durch den Studenten erlauben. Diese soll im Kurs über qualitative Vorgehensweise mit historisch-philosophischen Komponenten und Anwendungen in moderner Technik erreicht werden, wobei die fehlende Anschaulichkeit durch Computer-Simulationen und Visualisierungen kompensiert wird.
5. Relevant sind für die Lehramtsstudenten das Nachdenken über NOS-Konzepte, die über das eigentliche Fachgebiet hinausgehen, und über das Lernen von Quantenphysik auf einer Metaebene.

Zur Erstellung des Instruktionsmodells wurden zunächst Studenten der Testgruppe nach ihren Konzepten zur Quantenphysik, ähnlich der Prä-Pilotbefragung der Studenten in dieser Arbeit, befragt. *Atommodelle* konnten als Schlüsselthema identifiziert werden, da es trotz großer Vertrautheit als Grundlagenthema der Quantenphysik Quelle vieler Misskonzepte ist, enge Verbindungen zur Chemie bestehen, aber selbst in der Grundschule in Ansätzen besprochen wird. Außerdem ermöglicht es eine historische und philosophische Diskussion. Die Konzepte wurden anhand der Kontrollgruppe validiert und durch deren Analyse ein Unterrichtsgang konzipiert, welcher aus 12 Lektionen zu je 45 Minuten besteht. Diese wurden zur Rekonstruktion der Lernwege und Konzepte videografiert. Zusätzlich wurden Interviews und schriftliche Statements von der Testgruppe gefordert und mit Hilfe qualitativer Methoden analysiert. Zwei Wochen nach der Instruktion wurde der Fragebogen der Testgruppe zur Beantwortung vorgelegt und beide Gruppen hinsichtlich ihrer kognitiven Struktur unterschieden.

Die Anfangsergebnisse sind ähnlich denen bei MÜLLER und WIESNER (1997), das Planetenmodell wird mit 72 % favorisiert, es folgt das richtige Orbitalmodell, aber an dritter Stelle Modelle mit Elektronenwolken. Dreiviertel der verbalen Beschreibungen zeigen allerdings ein unklares Bild, nicht unterschiedene mentale Modelle existieren nebeneinander in der kognitiven Struktur der Studenten, wobei Fragen zur Unbestimmtheit oder zum Indeterminismus nicht mit den eigenen Atommodell in Übereinstimmung gebracht werden. Als Grund wird von den Autoren die enorme Dominanz der Newtonschen Mechanik gesehen. In der Testgruppe nach der Intervention hingegen zeichnen nahezu alle ein quantenphysikalisches akzeptables Orbitalmodell, hinzu kommen klare verbale Beschreibungen und Verbindungen zu Unbestimmtheitsrelation und Indeterminismus. Dies wird auch durch die Analyse der Lernwege mit konzeptueller Rekonstruktion bestätigt, welche durch die Betrachtung der eigenen Lernschwierigkeiten vorangetrieben werden konnte. Die Behandlung und Diskussion zu Fragen zu NOS waren verbunden mit einer klaren Unterscheidung klassischer und quantenphysikalischer Konzepte durch Teilnehmer der Testgruppe. Es zeigt sich keine wesentliche Steigerung der mathematischen Fähigkeiten zur Beschreibung der Quantenphysik, allerdings lassen sich auf die Kernideen tiefgreifendes, auch formal fundiertes Wissen aufbauen und negative motivationale Faktoren beim Wechsel von Konzepten vermeiden.

Im Seminar werden grundlegende Konzepte, wie die Unbestimmtheit, behandelt, wobei auch der Anschluss an den mathematischen Formalismus gesucht wird, vertiefende mathematische Ableitungen werden als Hintergrundinformationen gegeben. Moderne Anwendungen zur Quantenkryptographie und -informationstheorie sind ebenso Bestandteil. Hinzu kommen fachdidaktische Ansätze zur Behandlung von Schülervorstellungen und zur Einführung quantenphysikalischer Konzepte. Ausgearbeitete schulische Unterrichtsgänge werden vorgestellt und die Studenten entwickeln einen eigenen kohärenten Unterrichtsgang mit individuell geplanten Unterrichtsstunden.

4. Professionswissen von Lehramtsstudenten im Fach Physik

4.1. Historische Entwicklung

Am Anfang der Unterrichtsqualitätsforschung stand die Suche nach Charaktermerkmalen von Lehrern, die für den Lernerfolg der Schüler entscheidend sind (Persönlichkeitsparadigma GETZELS und JACKSON, 1970). Später ging man in der Unterrichtsqualitätsforschung dazu über, stärker Interaktionen im Klassenraum, das Unterrichtsklima (EDER, 2002) sowie die Unterrichtsführung und das Instruktionsverhalten der Lehrperson (ROSENSHINE, 1986) gleichsam abgelöst von der Lehrerpersönlichkeit zu betrachten (Prozess-Produkt-Paradigma). Als Unterrichtsqualitätsmerkmale galt nach ROSENSHINE (1979) die direkte Instruktion mit

- intensiver Zeitnutzung
- Explizitmachung von Lernzielen
- Sequenzierung von Unterricht
- ausreichenden Übungsphasen und
- ausführlicher Evaluation

Diese Merkmale der Unterrichtsführung wurden neben weiteren Aspekten des Klassenmanagements, wie der Selbstverantwortlichkeit des Schülers für sein Lernen und kognitiven und sozialen Faktoren auch in neuerer Zeit durch große Metastudien (WANG et al., 1990; HATTIE, 2009) bestätigt.

Ergänzt wurde später das Prozess-Produkt-Paradigma durch aus konstruktivistischer Sichtweise notwendigen Mediatorvariablen (BAUMERT und KÖLLER, 2000), um kognitive Verarbeitungsprozesse und Lernstrategien berücksichtigen zu können.

Eine Kombination dieser Erweiterung mit Persönlichkeitsmerkmalen wird u.a. von LEINHARDT und GREENO (1986) bei der Untersuchung der Unterschiede zwischen Experten und Novizen vorgeschlagen.

4.2. Komponenten des Professionswissens von Lehrern

Zur Operationalisierung des Konstruktes Professionswissen wurde eine Aufteilung in Fachwissen CK, fachdidaktischem Wissen PCK und pädagogischem Wissen PK vorgeschlagen. Diese geht auf die Taxonomie von SHULMAN (1986) mit einer siebenstufigen Einteilung zurück. Im deutschen Sprachbereich wurde die Aufteilung beispielsweise durch BROMME (1997) und die Autoren der COACTIV-Studie (KRAUSS und KUNTER, 2004) aufgenommen.

Ein Problem ist die bisherige fehlende empirische Fundierung der drei Wissensbereiche und ihre Entwicklung innerhalb des Lehramtsstudiums. RIESE (2009) beklagt den bisherigen Mangel an gesicherten Forschungserkenntnissen zur universitären Phase der Lehrerausbildung im deutschsprachigen Raum. In seiner Dissertation wurde eine bundesweite Kompetenzmessung zur Professionalität angehender Physiklehrer mittels Einsatz von Unterrichtsvignetten im Querschnittsdesign durchgeführt. Dabei wurde auch die Relevanz schulfernen physikalischen Fachwissens untersucht. Riese legt für seine Untersuchung einen vergleichbaren Kompetenzbegriff wie in der COACTIV-Studie (KRAUSS und KUNTER, 2004; BAUMERT et al., 2009) zu Grunde.

Laut BAUMERT et al. (2010) kann fachliches wie fachdidaktisches Wissen für die Mathematik sowohl theoretisch als auch empirisch mit Hilfe von Strukturgleichungsmodellen¹ voneinander klar getrennt werden, wenn auch eine hohe Interkorrelation besteht. Auch nach NEUWEG (2011) ist ein zumindest impliziter Anteil von Fachwissen im fachdidaktischen Wissen wahrscheinlich. TEPNER et al. (2012, S.8) stellen zusammenfassend fest: „Von den dargestellten Kategorien werden das Fachwissen, das fachdidaktische Wissen und das pädagogische bzw. pädagogisch-psychologische Wissen [...] als besonders relevant und hilfreich für eine lernförderliche Unterrichtsgestaltung (in den Naturwissenschaften) erachtet.“ Laut RIESE und REINHOLD (2014) gilt „dass dieses Wissen positiv auf das Lehrerhandeln und die Schulleistungen wirkt [...]“. Als gleich bedeutsam mit dem Wissen betrachten Baumert und Kunter (2006) auch Überzeugungen, motivationale Orientierungen und selbstregulative Fähigkeiten zur professionellen Kompetenz von Lehrkräften.“ In der Mathematik kommt BAUMERT et al. (2010) zu dem Ergebnis, dass PCK einen wesentlichen positiven Einfluss auf die Lernergebnisse hat; ein fundiertes Fachwissen sei aber ebenfalls ein Grundpfeiler der Lehrerverberufung.

Hinsichtlich dem Erwerb dieser drei Bereiche des Professionswissens bemerkt TEPNER et al. (2012): „Der zentralen Rolle dieser drei Kernbereiche liegt die Annahme zugrunde, dass das Professionswissen durch Ausbildung und unterrichtliche Praxis erworben werden kann.“

Das pädagogische Wissen

Die Wirkung des *pädagogischen Wissens* einer Lehrperson auf den Unterricht ist noch nicht

¹ „Mit Hilfe dieser Modelle können theoretisch hergeleitete Kausalzusammenhänge zwischen (latenten) Variablen anhand von empirischen Daten überprüft werden.“ (WOLF und BEST, 2010, S.775ff)

umfassend untersucht (siehe KIRCHER et al., 2009). Es ist fachübergreifend, -unabhängig und umfasst als wesentliche Komponenten Maßnahmen und Faktoren für eine effektive Klassenführung (SHULMAN, 1986) zur optimalen Nutzung der vorhandenen Lernzeit (SEIDEL und SHAVELSON, 2007). RENKL (2008) fasst sechs wichtige Prinzipien der Störungsprävention und dem Umgang mit Störungen zusammen:

1. Etablieren eines effizienten Regelsystems
2. Verhindern von Leerlaufphasen
3. Störungskontrolle
4. Auslagerung nicht fachbezogener Aktivitäten
5. zügiger Unterrichtsfluss
6. Klarheit und angemessenes Anforderungsniveau

Bei GROSSMANN (1990) kommen außerdem Wissen über Instruktionsprinzipien, Lernprozesse und Persönlichkeitsmerkmale, die den Lernprozess beeinflussen, wie Selbstwirksamkeitserwartung und Motivation, hinzu.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die beiden folgenden Bestandteile des Professionswissens und untersucht deren Zusammenwirken. Die pädagogische Komponente wird im weiteren Verlauf nicht betrachtet.

Das Fachwissen

Das *Fachwissen für Lehrer* umfasst nach SHULMAN (1986) nicht nur das deklarative Wissen über Fachinhalte, sondern auch Begründungen, warum der Fachinhalt unterrichtet wird und wie er zu systematisieren ist. Hinzu kommen nach Ansicht des Autors das grundlegende konzeptionelle Verständnis, das Erkennen, wann ein Konzeptwechsel notwendig ist, Anerkennung der Interpretationsvielfalt, gerade in der Quantenphysik und das Wissen über die physikalische Modellbildung. Teilweise werden diese Bereiche von anderen Autoren aber auch dem fachdidaktischen Wissen zugeordnet. Wesentlich sind drei Hauptpunkte des fachlichen Wissens:

1. Kenntnis wesentlicher Experimente
2. Konzeptionelles Verständnis
3. Definition wichtiger Begriffe und deren Vernetzung

Nach WOITKOWSKI et al. (2012, S.1) „kann Fachwissen, vermittelt über das fachdidaktische Wissen, als bedeutsamer Prädiktor für eine kognitiv herausfordernde und konstruktiv unterstützende Unterrichtsgestaltung gelten [...]. Fehlt Fachwissen, so schlägt sich dies direkt auf die Schülerleistungen nieder [...]. Weiterhin hat es sich als notwendige Voraussetzung zum Erwerb von fachdidaktischem Wissen erwiesen.“

Zusammenfassend erläutert REUSSER und MESSNER (2002, S.285): „Grundsätzlich soll jede Lehrperson in den Fächern, die sie unterrichtet, mit den disziplinären Denk- und Arbeits-

weisen vertraut sein und über ein fachbezogenes Wissen, das in Breite und Tiefe deutlich über den Horizont des später zu vermittelnden Unterrichtsstoffes hinaus geht, verfügen.“ Die notwendige Tiefe der fachlichen Ausbildung wird auch bei TEPNER et al. (2012, S.10) deutlich: „Fasst man alle genannten und unterschiedlich komplexen Ansätze zusammen, ist der Konsens erkennbar, dass zur adäquaten fachlichen Vorbereitung des Unterrichts Wissen erforderlich ist, das über die Schulstufe hinausgeht, in der unterrichtet wird.“ Allerdings gibt der Autor auch folgende Seite zu bedenken: „Die einseitig universitär ausgerichtete Fachausbildung vernachlässigt zudem oft den für Lehrpersonen wichtigen vernetzenden Blick in die Breite verbunden mit einer interdisziplinären Betrachtungsweise. Fachliche Multiperspektivität ist jedoch eine wichtige Voraussetzung für den fächerübergreifenden und interdisziplinär angelegten Unterricht in verschiedenen Bildungsbereichen der Schule.“ Es wird die Besonderheit der lehrplanorientierten Studienperspektive betont, die sich von der fachwissenschaftlichen in der inhaltlichen Schwerpunktsetzung unterscheidet. WOITKOWSKI et al. (2011, S.303) schlagen daher eine vertieftes, schulorientiertes Wissen vor: „Das vertiefte Wissen schlägt die Brücke zwischen den vorherigen beiden Stufen und vermindert so die ‚doppelte Diskontinuität‘ (scheinbare Irrelevanz des schulischen Wissens im Fachstudium und ebenso scheinbare Irrelevanz des an der Universität erworbenen Fachwissens im späteren Lehrerberuf.)“ Es umfasst nach Ansicht der Autoren:

1. Explizite Kombination von Schul- und universitärem Wissen
2. Anwendung von universitären Denkweisen auf typische Probleme der Schulphysik
3. Systematisierung und Herstellung von Zusammenhängen des Schulwissens vor dem Hintergrund universitärer Physik; eine umfassende Sicht auf die Physik als Ganzes (im Sinne Kleins für die Mathematik)
4. Einübung (bzw. Erfassung) von elaborierten Denk-, Sprech- und Verhaltensweisen im Umgang mit Physik anhand von Gegenständen der Schulphysik
5. Reflexion von Bedeutung, Genese und Verwendung von Begriffen der Schulphysik
6. Nutzung der Punkte 4 und 5 zur Analyse und Transformation von Fehlkonzepten der Schüler

Diese Stufe des Fachwissens kann auch von sehr guten Schülern erreicht werden und sollte Basis für das Erklärungsrepertoire eines erfolgreichen Lehrers sein. Gerade im Bereich der Quantenphysik beziehen sich grundlegende Probleme, wie im Abschnitt 3.4 erläutert, häufig auf den Bereich des Fachwissens.

Das fachdidaktische Wissen

Das *fachdidaktische Wissen* stellt nach SHULMAN (1986) gewissermaßen eine Verschmelzung von Fach- und Pädagogikwissen dar, wie Abbildung 4.1 zeigt.

„[PCK Anm.d.A.] represents the blending of content and pedagogy into an understanding

of how particular topics, problems, or issues are organized, represented, and adapted to the diverse interests and abilities of learners, and presented for instruction“ (SHULMAN, 1987, S.8)

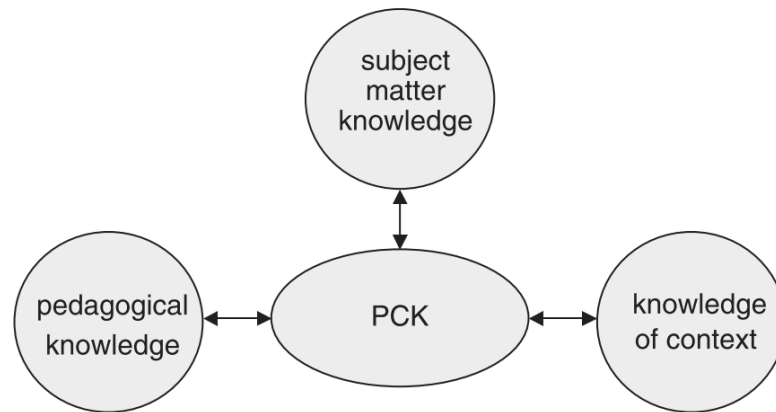


Abbildung 4.1.: Abgrenzung des fachdidaktischen Wissens PCK von anderen Formen des Lehrwissens, zit. nach VAN DIJK und KATTMANN (2007)

„Zum Verständnis des Professionswissens von Lehrkräften ist die Dimension des fachdidaktischen Wissens von zentraler Bedeutung.“ (TEPNER et al., 2012)

In LEE und LUFT (2008) findet sich eine Zusammenfassung der Ansätze zur Beschreibung dieser Wissensart. Dabei kristallisieren sich das Wissen über Schülerlernprozesse, Schülervorstellungen und Lehrstrategien zur Unterrichtsstrukturierung (Methoden, Medien, geeignete Rekonstruktion der Lehrinhalte) als wesentliche Komponenten heraus. Neben diesen deklarativen Teil kommen die Vermittlungskompetenz als auch das Verhalten der Lehrkraft in kritischen Unterrichtssituationen und der adäquate Umgang mit Modellen hinzu (TEPNER et al., 2012, S.21). Mit „kritisch“ ist hierbei gemeint, dass das richtige Verständnis und die Auflösung falscher Schülervorstellungen vom Lehrerhandeln abhängt. Allerdings ist die Aufgliederung des fachdidaktischen Wissens keineswegs einheitlich wie die Übersicht 4.2 zeigt.

Die Autoren der Übersicht (GRAMZOW et al., 2013) stellen fest: „Es ist leicht ersichtlich, dass die Facetten Schüler und Schülerkognitionen sowie Instruktions- und Vermittlungsstrategien fast allen Konzeptualisierungen von PCK und FDW gemeinsam sind.“² So lässt

² Die Autoren unterscheiden explizit zwischen den beiden theoretischen Konstrukten pedagogical content knowledge (PCK) und Fachdidaktisches Wissen (FDW), wobei als wesentlicher Unterschied die Integration von fachlichem, pädagogischem und unterrichtssituationsspezifischen Wissen als Bestandteile von PCK im englischsprachigen Raum (integratives Modell) im Gegensatz zum transformativen Modell mit eigenständigem fachdidaktischen Konstrukt im deutschsprachigen Raum gesehen wird, wie es auch im obigen Zitat von SHULMAN (1987) deutlich wird.

Referenz / Facette	Instruktions- und Vermittlungsstrategien	Schüler und Schülerkognitionen	Ziel von gelehrtem Fachinhalt	Lehrplan	Bewertung und Beurteilung	Medien	Fachwissen	Kontext	Pädagogik
Shulman (1986)	x	x							
Tamir (1988)	x	x		x	x				
Smith & Neale (1989)	x	x	x						
Grossman (1990)	x	x	x	x					
Marks (1990)	x	x				x	x		
Cochran et al. (1993)		x					x	x	x
Geddis et al. (1993)	x	x		x					
Fernandez-Balboa & Stiehl (1995)	x	x	x				x	x	
van Driel et al. (1998)	x	x							
Magnusson et al. (1999)	x	x	x	x	x				
Hashweh (2005)	x	x	x	x	x		x	x	x
Loughran et al. (2006)	x	x	x				x	x	x
Krauss (2006)	x	x							
Park & Oliver (2008)	x	x	x	x	x				
Lee & Luft (2008)	x	x	x	x	x	x			
Rohaam (2009)	x	x	x						
Riese (2009)	x	x	x	x	x				
van Dijk & Kattmann (2010)	x	x							

Abbildung 4.2.: Aspekte fachdidaktischen Wissens bei verschiedenen Autoren, zit. nach GRAMZOW et al. (2013)

sich als gemeinsamer Nenner für das fachdidaktische Wissen die Analyse von Lernschwierigkeiten von Schülern und die geeignete Repräsentation fachlicher Inhalte zur Überwindung dieser nennen.

Das Kompetenzmodell nach Riese

Ein erweitertes Modell liefert RIESE (2009) mit der Aufteilung in eher deklarative³ und prozedurale⁴ Komponenten, wie Abbildung 4.3 zeigt. „Die Bedeutung changiert in den Modellen zwischen kognitivem Umgang mit deklarativem Wissen (knowing that; abfragbar beispielsweise in einem Wissenstest), einem Können in Bezug auf Unterricht oder einer Grundlage von Handeln. Dies spiegelt die Absicht der Modelle wider, Professionswissen als

³ Speicherung von Fakten im Gedächtnis

⁴ Manipulation bzw. kognitiver Umgang mit Fakten

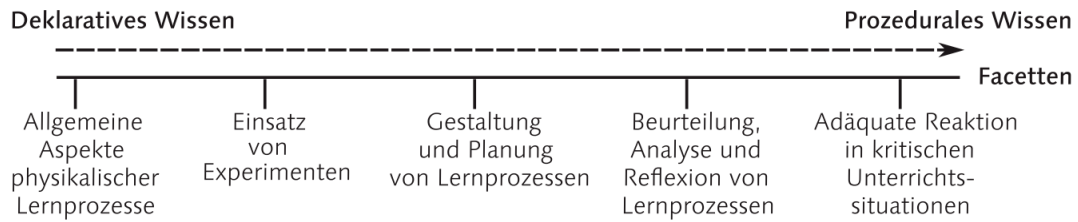


Abbildung 4.3.: Eindimensionales Facettenmodell fachdidaktischen Wissens nach RIESE (2009), zit. nach GRAMZOW et al. (2013)

Teil von Handlungskompetenz zu modellieren und dabei Bezüge zum Können oder direkt zum Handeln herzustellen, ohne dabei auf die unterstellten Zusammenhänge von Wissen und Können bzw. Wissen und Handeln explizit einzugehen.“ (GRAMZOW et al., 2013, S.18) Zum Zusammenhang der Komponenten lehramtsspezifischer Kompetenz erläutert RIESE (2009), dass „Fachwissen ebenso wie fachdidaktisches Wissen unmittelbar relevant für das Handeln im Unterricht zu sein scheint.“ Dabei konkretisiert er in seiner Arbeit, dass vernetztem Schulwissen auf einem vertieften Niveau gegenüber rein universitärem Fachwissen offenbar die größere Bedeutung beizumessen ist:

Die Vernetzung vorhandener Wissensbestände sowie das Kennenlernen unterschiedlicher fachlicher Zugänge zu einem Themengebiet dürften dabei von zentraler Bedeutung für fachbezogene Unterrichtsprozesse sein, wobei außer Frage steht, dass Lehramtsstudierende natürlich auch einen Einblick in forschungsnahe Wissensbestände erhalten sollten. Die Ergebnisse können jedoch nicht dahingehend interpretiert werden, dass Wissen auf rein universitärem Niveau irrelevant für den späteren Lehrberuf ist. Schließlich gehört zumindest exemplarisch anschlussfähiges Wissenschaftswissen auch zur Bildung von zukünftigen Lehrkräften. Allerdings untermauern die Daten den Stellenwert von Fachwissen auf niedrigeren Niveaus. Wissen auf Schulniveau und vertieftes, vernetztes, schulnahes Wissen scheint unmittelbar bedeutender für das Handeln im Kontext von (Physik-)Unterricht zu sein, so dass dieser Bereich im Lehramtsstudium keinesfalls zu kurz kommen darf. (RIESE, 2010, S.5f)

Schulbezogenes Fachwissen und das Kennenlernen unterschiedlicher fachlicher Zugänge wirken sich günstig auf die Professionalisierung von Lehramtsstudenten aus. Rieses Studie zeigt, dass Studierende im Hauptstudium signifikant besser als Studenten im Grundstudium in allen Bereichen des Professionswissens sind. Weiterhin steigern sich positiv besetzte wissenschaftstheoretische Beliefs der Studenten. Die Studie zeigt, dass fehlendes Fachwissen hohes fachdidaktisches Wissen verhindert. Fachliches und pädagogisches Wissen sind notwendige, aber nicht hinreichende Voraussetzungen für fachdidaktisches Wissen, wie

RIESE (2009) für den Inhaltsbereich Mechanik zeigen konnte. Die Qualität der Erklärungen von Lehrern steigt mit höherem fachspezifischen Wissen. Die Mechanikfähigkeiten sind ein guter Prädiktor für die andern Ausbildungsbereiche der Physik (FRIECE und LIND, 2004). Riese zeigt weiterhin, dass rezeptartiges Unterrichtsvorgehen mit geringem Fachwissen korreliert ist. BOROWSKI et al. (2011) geben allerdings zu bedenken, dass Lehrkräfte erst hauptsächlich während ihrer Referendariatszeit schulrelevantes Fachwissen entwickeln, obwohl das Fachwissen in dieser Zeit nicht gelehrt wird, nichtsdestoweniger ist eine möglichst frühen Förderung der beiden Kompetenzen notwendig. Als Ziele für die Kompetenzentwicklung führt REINHOLD (2004, S.134) an: „Ein fachdidaktisches Curriculum in der Ersten Phase der Lehrerausbildung würde dann ein grundlegendes, gut strukturiertes und vernetztes fachdidaktisches Fachwissen auf den Stufen Faktenwissen/Reflexion/Kommunikation/Urteil (vgl. Terhart, 2002) und ein Beispielwissen auf den Stufen Analyse und Bewertung/Planung/Erprobung/Evaluation (vgl. Brüggemann et al., 2000) beinhalten.“

Erst für die für zweite und dritte Phase der Lehrerbildung, Referendariat und Fortbildung im Beruf, wird das fachdidaktische Wissen zu Skripts und Schemata für den Fachunterricht durch Entwicklung von Handlungsrouninen umgeformt. Nach VAN DIJK und KATTMANN (2007, S.889) ist Fachdidaktikwissen individuell und kann nicht direkt von einem Experten an einem Novizen weitergegeben werden, denn Unterrichtserfahrung ist essenziell für die Entwicklung von PCK (GROSSMANN, 1990). Eigene Erfahrungen als Schüler reichen aber nicht aus, erst die eigene Lehrerfahrung macht den Unterschied. Daraus schließen VAN DIJK und KATTMANN (2007, S.891): „PCK can be concluded that teacher training is necessary for novice and experienced teachers to enable them to learn from their experiences.“ Eine Möglichkeit solche Erfahrungen ist beispielsweise die eigenständige Entwicklung einer Lernumgebung.

5. Forschungsfragen und Hypothesen

Auf Grund der aufgeführten Mängel in der Professionalisierung von Lehramtsstudenten stellt sich für diese Arbeit die grundsätzliche Forschungsfrage, wie man die Quantenphysikausbildung im Lehramt verbessern kann. Diese Dissertation möchte Impulse geben, Probleme in der Ausbildung von Lehrern in moderner Physik aufzuzeigen und konkrete Verbesserungsvorschläge für den universitären Teil der Lehramtsausbildung geben. Diese Hauptfrage lässt sich in die Bereiche der Anforderungsanalyse, der Konzeption eines adäquaten Seminars und die Bestimmung dessen Wirksamkeit hinsichtlich fachlicher und fachdidaktischer Kompetenzen aufteilen:

1. Was sind die Komponenten lernwirksamer Hochschulausbildung für Lehramtsstudenten in moderner Physik am Beispiel der Quantenphysik?
2. Welche Anforderungen an die Quantenphysikausbildung stellen Lehramtsstudenten einerseits und Lehrpersonen andererseits?
3. Wie stellt sich das Professionswissen von Lehramtsstudenten am Ende der theoretischen Quantenphysikausbildung dar und wie ändert sich dieses durch einen fachdidaktischen Zusatzkurs?

Aus diesen Arbeitsfeldern ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- F1** Welche Anforderungen stellen Studenten und Dozenten an eine umfassende quantenphysikalische Ausbildung, welche sowohl Kompetenzen hinsichtlich eines breiten fachlichen Verständnisses der Quantenmechanik als auch fachdidaktische Komponenten einschließt?
- F2** Wie stellt sich das fachliche und fachdidaktische Wissen der Studenten am Ende der theoretischen Ausbildung dar?
Welche Unterschiede gibt es beim Wissen der Studenten?
- F3** Wie ist ein die Theorie ergänzendes fachdidaktisches Seminar zur Quantenphysik mit Hilfe der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion nach LOHMANN (2006, S.66) und VAN DIJK und KATTMANN (2007) zu planen?
- F4** Ist ein so geplantes, ergänzendes Seminar lernwirksam hinsichtlich fachlicher und fachdidaktischer Kompetenzen?
Lässt sich eine Erweiterung des konzeptionellen Verständnisses der Studenten fest-

stellen?

Aus diesen Forschungsfragen lassen sich bis auf F3 testbare statistische Hypothesen ableiten, die dritte Frage ist konzeptioneller Natur und kann nur indirekt über die Ergebnisse von Leistungstests und könnte schlussendlich erst im Verhalten der Studenten als künftige Lehrer im Unterricht beurteilt werden. Die den einzelnen Forschungsfragen zugeordnete Hypothesen lauten:

- H1.1** Lehramtsstudenten fühlen sich am Ende der theoretischen Ausbildung fachlich gut, fachdidaktisch aber ungenügend vorbereitet.
- H1.2** Lehramtsstudenten legen bei zusätzlicher fachdidaktischer Ausbildung starken Wert auf unterrichtspraktische Aspekte (Siehe KREUTZMANN, 2003).
- H1.3** Dozenten der Theoretischen Physik zielen hauptsächlich auf fachliche Kompetenz der Lehramtsstudenten in ihren Veranstaltungen ab.
- H1.4** Die von den Dozenten genannten wesentlichen Konzepte entsprechen den Ergebnissen anderer Untersuchungen zum Thema, siehe Abschnitt 3.1.
- H1.5** Haupthindernis für die erfolgreiche Durchführung ihrer Lehrveranstaltung ist aus Dozentsicht der geringe fachliche Umfang der Lehramtsausbildung.
- H2.1** Die Unterscheidung in gutem fachlichen und eher geringem fachdidaktischen Wissen zur Quantenphysik zeigt sich analog zur Hypothese H1.1 auch in einem zweikomponentigen Leistungstest.
- H2.2** Am Ende der theoretischen Ausbildung gibt es unterschiedliche Leistungsgruppen von Studenten, die eine spezifische Weiterführung der fachlichen und fachdidaktischen Ausbildung benötigen.
- H4.1** Ein nach Forschungsfrage F4 geplantes Seminar ist lernwirksam im Vergleich zu einer Kontrollgruppe hinsichtlich fachlicher und fachdidaktischer Kompetenzen. Der Unterschied ist mit mindestens mittlerer Effektstärke¹ ausreichend deutlich.
- H4.2** Die fachlichen und fachdidaktischen Kompetenzen sind nicht unabhängig voneinander, sondern korrelieren moderat (Siehe KIRSCHNER et al., 2011, S.6).
- H4.3** In der Versuchsgruppe ist ein Wissenszuwachs festzustellen, der sich in der Veränderung der erstellten Concept Maps (CM) als Repräsentation der zugrunde liegenden kognitiven Struktur zeigt (Siehe STRACKE, 2004b):
 - Es zeigen sich neue Begriffe in den CM.
 - Es zeigen sich neue Relationen in den CM und die Verknüpfungsdichte und damit die Engmaschigkeit des Netzes steigt.

¹ Vergleichbare Ergebnisse wie RIESE und REINHOLD (2012, S.130), in der vorliegenden Arbeit für den speziellen Bereich der Quantenphysik

-
- Es zeigt sich eine Umstrukturierung und Neuorganisation in den CM als Maß für die Änderung der kognitiven Struktur der Teilnehmer, insbesondere werden ungünstige Begriffe und Relationen gelöscht.

Teil II.

Anforderungsanalyse der Lehramtsausbildung

In diesem Teil der Arbeit werden die Anforderungen sowohl der Lehramtsstudenten als auch ihrer Dozenten an die Ausbildung in Quantenphysik gesammelt und analysiert. Die Antworten liefern wertvolle Hinweise, um das Studium mit Hilfe eines zu konzipierenden, die theoretische Ausbildung ergänzenden Seminars zu verbessern.

Zum einen nehmen die Studenten Lehrveranstaltungen auf ihre Art wahr und setzen sich Ziele für die eigene Professionalisierung. Dem gegenüber stehen Dozenten mit spezifischen Zielen hinsichtlich Inhalten und zu vermittelnden Kompetenzen. Soll der Verbesserungsprozess in der Ausbildung gelingen, müssen diese beiden Ansprüche in Passung gebracht und Leitlinien für die Ausbildung im Sinne der Didaktischen Rekonstruktion² erarbeitet werden. Dabei wird nicht nur die Perspektive der Lehramtsstudenten hinsichtlich wahrgenommener Vorlesungsinhalte der Quantenphysik, der Einschätzung der eigenen Kompetenz, Anforderungen an die Ausbildung und möglicher Schulinhalte Berücksichtigung finden, sondern diese auch mit dem Blickwinkel der Lehrpersonen aus Praxis und fachdidaktischer Theorie verglichen. Die Sichtweise der Dozenten wird durch die Befragung nach dem Verhältnis von Zielen und tatsächlich behandelten Themen der Theorievorlesungen, angestrebten Kompetenzen und wichtigen Konzepten der Quantenphysik untersucht. Die Vorlesungsinhalte und Kompetenzziele können dann zwischen diesen beiden Gruppen verglichen werden. Neben der deskriptiven Beschreibung und Kategorienbildung durch eine Qualitative Inhaltsanalyse, werden die beiden Perspektiven durch die Einteilung in verschiedene Grundtypen kategorisiert.

² siehe Abschnitt 2.3, S.23

6. Studiendesign

Im ersten Kapitel der Anforderungsanalyse soll das Design der Studie mit dem Untersuchungsablauf, der Stichprobenbeschreibung sowie den Instrumenten und den zugehörigen Auswertemethoden vorgestellt werden. Dafür wird die Entwicklung der Fragebögen, ihre Pilotierung nach Entwicklung der Fragebögen und deren Einsatz in der Hauptstudie mit der Erhebung der Rohdaten beschrieben. Diese Daten werden im Weiteren neben der deskriptiven Beschreibung auch für die Typenbildung durch Clusterung von Antworten der Studenten und Dozenten verwendet. Bei den Lehrenden werden die gebildeten Kategorien zusätzlich qualitativ ausgewertet. Die Clusteranalyse, Kodierung und Auswertung mit Hilfe der qualitativen Inhaltsanalyse und der Darstellung über Kontingenztabellen wird im Kapitel 6.3 Auswertemethoden vorgestellt.

6.1. Untersuchungsablauf und Stichprobe

Für die Experteninterviews mit Lehrpersonen aus der theoretischen Physik wurde ein Fragebogen mit offenen und geschlossenen Fragen entwickelt. Dieser wurde mit fünf Dozenten der TU Dresden Ende 2010 in halb-standardisierten Interviews in Anlehnung an BORTZ und DÖRING (2006, Seite 256) validiert. Der Fragebogen wurde leicht verbessert und die modifizierte Version als Onlinefragebogen im Umfragesystem Limesurvey Mitte 2013 an 73 Dozenten aus dem Bundesgebiet, die mit Ausbildung von Lehramtsstudenten in Quantenphysik betraut sind, verschickt. Die Antwortrate lag mit 24 ausgefüllten Bögen bei etwas mehr als einem Drittel.

79 Prozent der untersuchten Quantenphysik-Vorlesungen waren spezifisch auf das Lehramt ausgerichtet. Die Ausbildung der Lehramtsstudenten übernehmen neben rein fachlichen Hochschullehrern der theoretischen Physik in einigen Bundesländern und Hochschulen auch die Dozenten der fachdidaktischen Lehrstühle selbst. Bei den Lehrveranstaltungen handelte es sich nahezu ausschließlich um Pflichtvorlesungen/-übungen, nur eine wurde von dem Dozenten als ebenfalls verpflichtendes Tutorium bezeichnet. Bei dem Übungsteil unterteilen sich die Lehrveranstaltungen laut Aussage der Dozenten zur Hälfte in klassische Vorrechenübungen, die andere Hälfte wiederum gleichmäßig in Übungen, bei denen Studenten aktiv werden und Referate halten und Seminare, bei denen beide Seiten aktiv sind. Nur eine Lehrveranstaltung wird komplett als Seminar gehalten. Die Erfahrung

der Seminarleiter fällt sehr unterschiedlich aus, auffällig ist aber der große Anteil von 64 Prozent mit geringer Erfahrung von ein oder zwei Semestern, jeder Zwölfte hat die Lehrveranstaltung zur Quantenphysik schon dreimal, knapp ein Sechstel viermal und 12 Prozent bereits fünfmal oder mehr gehalten. Die Schwerpunkte werden von 71 Prozent der Dozenten anders als bei den Vorlesungen der Fachphysiker gesetzt.

Bei den Studenten verlief die Fragebogenerstellung ebenfalls über einen zweistufigen Prozess, wobei allerdings zunächst im Gegensatz zu den Dozenten in der halb-standardisierten Explorationsbefragung die offenen qualitativen Antworten zu wesentlichen Kategorien verdichtet wurden, um diese später für den quantitativen Fragebogen der größeren Hauptstudie nutzen zu können. Die Befragung fand Ende 2010 mit fünf Studenten der Technischen Universität Dresden im persönlichen Interview statt. Die Kategorien konnten nach Transkription der Interviews mit Hilfe des Programmes MAXQDA durch eine Qualitative Inhaltsanalyse nach MAYRING (2010) bestimmt werden. Nachfolgend wurde in einer zweiten Stufe eine quantitative Studentenforschung mit Leipziger Studenten Anfang 2011 durchgeführt und Mitte 2013 die Umfrage auf Lehramtsstudenten aus dem Bundesgebiet erweitert. Aus dem Bundesgebiet haben insgesamt 110 Studenten vorwiegend aus dem sechsten bis zehnten Fachsemester (Mittelwert: 7.71, Standardabweichung: 2.11) den Fragebogen vollständig ausgefüllt.

Für den Onlinefragebogen wurde das Umfragetool *Limesurvey* genutzt. Sowohl Dozenten- als auch Studentenfragebögen wurden anschließend mit der freien Programmiersprache für statistische Analysen *R* (Version 3.3.3) unter Verwendung der Oberfläche *R Studio* (Version 1.0.136) ausgewertet. Die verwendeten Zusatzpakete und Optionen finden Sie auf Seite 257 im Abschnitt 28.

6.2. Instrumente

Zur Datengewinnung wurden in der Pilotierung mündliche und in der Hauptstudie schriftliche Befragungen¹ zur Exploration des Forschungsfeldes eingesetzt. Die Pilotierungsphase mit jeweils fünf Dozenten und Studenten diente zur Validierung und Verbesserung der Befragungsinstrumente, im studentischen Fragebogen zusätzlich auch zur Kategorienbildung von Vorlesungs-, Zusatzseminar- und geeigneten Schulinhalt. Außerdem wurden Testfragen aus den Studien von ROBERTSON und KOHNLE (2010) und BAILY und FINKELSTEIN (2009) den Studenten der Pilotbefragung zur konfirmatorischen Untersuchung gestellt.

Die Testitems setzen sich im Sinne eines sequenziellen Mixed-Methods-Ansatzes nach TASHAKKORI und TEDDLIE (2010, Part 2) und speziell für die Inhaltsanalyse bei MAYRING (2012) aufeinander beziehende Fragen mit quantitativem Antwortcharakter wie Single-Choice und Multiple-Choice-Antworten als auch qualitativen Freitextantworten

¹ Den Studentenfragebogen finden Sie im Anhang 32, S.275 und den Dozentenfragebogen im Anhang 31, S.265.

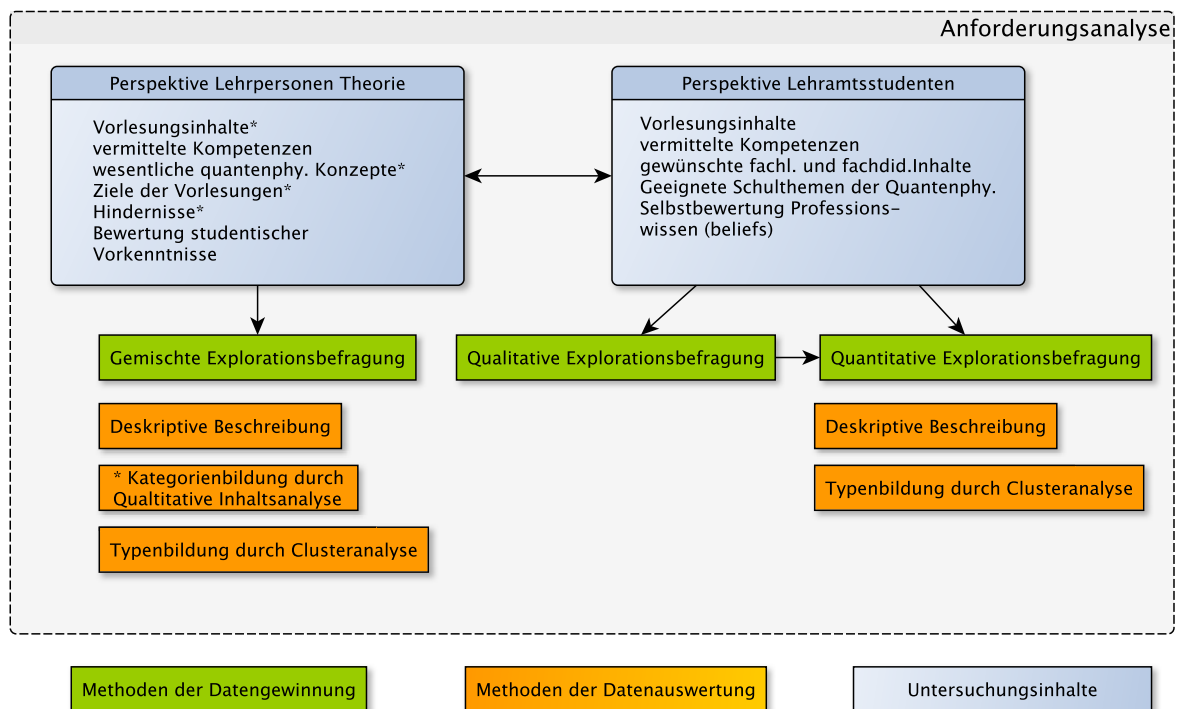


Abbildung 6.1.: Der Aufbau der Anforderungsanalyse

zusammen. Die Abb.6.1 zeigt die einzelnen Instrumente mit Studenten- und Dozenten-Perspektive in den beiden oberen Kästen. Die Inhalte, welche in der Hauptstudie mit Hilfe der Kategorisierung von Freitextantworten qualitativ ausgewertet werden, sind mit einem Stern gekennzeichnet. Die Antwortkategorien wurden zur deskriptiven Beschreibung, Kategorienbildung mit Kontingenzanalyse und für eine Typenbildung durch Clusteranalyse quantitativ kodiert.

Die beiden Fragebögen der Hauptstudie beinhalten Komponenten, die sowohl den Ist-Zustand als auch den Soll-Zustand der Ausbildung charakterisieren. Sie dienen dazu, dass zusätzliche Seminar bedarfsorientiert zu gestalten.

Für den ersten Punkt der Bestandsaufnahme wurde nach den Vorlesungsinhalten gefragt, die Dozenten außerdem nach Hindernissen, die der Vermittlung der Inhalte entgegenstehen. Die Studenten sollten die durch Vorlesungen in der Theorie entwickelten Kompetenzen, insbesondere ihr eigenes Fachwissen (content knowledge (CK)) und fachdidaktisches Wissen (PCK) selbst bewerten. Diese stellen natürlich nicht objektive Einschätzungen des Professionswissens dar, sondern zeigen eher die Überzeugungen² der Studenten über ih-

² RIESE (2009) unterscheidet diese in solche zur Wissenschaftstheorie, über das Lernen/Lehren, fachübergreifend zur Rolle des Lehrers und der Schule, über Inhalte der Lehrerbildung und Wirksamkeitserwartungen. Die beiden letzteren sollen hier im Fokus stehen.

re eigene Leistungsfähigkeit. Objektive Daten über die beiden Wissensbereiche liefern Leistungstests, die im Abschnitt IV dargestellt werden. Nichtsdestoweniger sind aber sowohl die Überzeugungen als auch das Fachwissen für die Konzeption des zusätzlichen Seminars interessant, da beide in die professionelle Kompetenz der angehenden Lehrkräfte hineinwirken (siehe beispielsweise das Kompetenzmodell von WOITKOWSKI et al., 2012). Als Soll-Variablen wurden sowohl die Ziele der Vorlesungen und die damit verbundenen zu erreichenden Kompetenzen von den Lehrenden als auch gewünschte fachliche und fachdidaktische Inhalte in der Ausbildung sowie geeignete Schulthemen aus der Quantenphysik von den angehenden Lehrern erfragt. Hinzu kommt die Ermittlung wichtiger quantenphysikalischer Konzepte aus Dozentensicht.

Im *Studentenfragebogen* wurden statistische Angaben zum Fachsemester und zum Studienort erfragt. Es folgten Multiple-Choice-Items mit mehreren Antwortmöglichkeiten zu den inhaltlichen Kategorien der Vorlesungsinhalte, den gewünschten Inhalten für das zusätzliche Seminar, die nicht in der Vorlesung enthalten sind, sowie geeigneten bzw. ungeeigneten schulischen Schwerpunkten. Bei den Fragen zu fachlichen Kompetenzen, der Notwendigkeit der Vermittlung mathematischer, historischer und philosophischer Inhalte und dem Deutlichwerden der Grundkonzepte der Quantenphysik im Single-Choice-Design wurde nur eine Antwort erwartet.

Im *Dozentenfragebogen* wurden statistische Angaben zur Stichproben, wie die Art der Vorlesung, Lehrerfahrung der Dozenten in diesem Bereich, Schwerpunktsetzung und Spezifität der Lehramtsausbildung im Fragebogen mit Hilfe von Single-Choice-Items erfragt. Die Ziele und Themen der Vorlesungen, sowie die der Erreichung dieser Ziele entgegenstehende Hindernisse und wesentliche Konzepte der Quantenphysik wurden als Fragen mit offenen Antwortmöglichkeiten ermittelt und nach Kategorienbildung³ in ihrer Häufigkeit ausgezählt. Hinzu kommen neben den durch Kategorisierung ausgewerteten Antworten im Dozentenfragebogen Items zum Umfang der theoretischen Ausbildung, den mathematischen Vorkenntnissen der Studenten und den angestrebten Kompetenzen, welche mit Hilfe von Single-Choice- bzw. bei der letzten Frage mit Multiple-Choice-Antwortmöglichkeit erfragt wurden.

6.3. Auswertemethoden und Gütekriterien

Die beiden speziellen zur Anforderungsanalyse verwendeten Methoden gliedern sich in die Clusteranalyse, die mit Hilfe des Paketes *Cluster 2.05* in R 3.3.2 realisiert wurde und in die qualitative Inhaltsanalyse mit Hilfe des Programmes MAXQDA Mobile. Zunächst soll jeweils das Ziel der beiden Methoden dargestellt werden, später auf das eigentliche Verfahren und schließlich auf Gütekriterien für die Methoden eingegangen werden.

³ Methode der Paraphrasierung in der Qualitativen Inhaltsanalyse nach MAYRING (2010)

6.3.1. Qualitative und Quantitative Inhaltsanalyse

Nach einem der Standardwerke MAYRING (2010) ist die qualitative Inhaltsanalyse die systematische Auslegung von Text, die theorie- oder zumindest regelgeleitet erfolgt und damit für andere Forscher nachvollziehbar wird. Sie findet oft in Pilot- oder Vertiefungsstudien Anwendung, liefert neben Begriffen und Kategorien auch Fragestellungen und Hypothesen für quantitative Untersuchungen und hilft, diese im Umkehrschluss zu interpretieren und durch Plausibilitätsüberprüfung, Typologisierungen⁴ in verschiedene Fälle einzuteilen.

Bei der Unterscheidung von quantitativer und qualitativer Inhaltsanalyse herrscht allerdings keine deutliche Trennung. So wird bei MAYRING (2010) nicht klar zwischen der Anwendung beider Methoden im Forschungsprozess unterschieden. BORTZ und DÖRING (2006, S.149) hingegen trennen beide Verfahren klar, wie ihre Definitionen zeigen: „Die quantitative Inhaltsanalyse erfasst einzelne Merkmale von Texten, indem sie Textteile in Kategorien einordnet, die Operationalisierungen der interessierenden Merkmale darstellen. Die Häufigkeiten in den einzelnen Kategorien geben Auskunft über die Merkmalsausprägungen des untersuchten Textes.“ Dieser Quantifizierung gegenübergestellt „werden bei qualitativen Inhaltsanalysen die zugeordneten Textteile nicht ausgezählt, sondern interpretiert und z. B. unter Zuhilfenahme tiefenpsychologischer Theorien mit der Zielsetzung gedeutet, verborgene Sinnzusammenhänge zu ergründen.“

Eine Verbindung schafft KUCKARTZ (2014, S.49ff). Er folgt methodisch weitgehend Mayring, unterscheidet allerdings zwischen klassischer (quantitativer Inhaltsanalyse) und qualitativer Inhaltsanalyse. Letztere unterscheidet sich seiner Meinung nach dadurch, dass (statistische) Hypothesen bei qualitativen Inhaltsanalysen eher selten formuliert werden, Auswertung und Erhebung parallel erfolgen und die Kodierung des Materials meist stärker hermeneutisch-interpretativ erfolgt. Die Kategorien haben eher strukturierenden und systematisierenden Charakter und dienen nicht vorwiegend der Quantifizierung.

Diese Arbeit sieht die Kategorisierung als Möglichkeit zur Systematisierung, legt aber durch Häufigkeits-, Kontingenz- und Clusteranalysen großen Wert auf deren statistische Auswertung. Der größte Nutzen lässt sich daher in der Integration beider Aspekte als eine Anwendung von Mixed Methods (GLÄSER-ZIKUDA et al., 2012; TASHAKKORI und TEDDLIE, 2010) erzielen, wie auch MAYRING (2012, S.27ff) betont. KUCKARTZ (2007, S.227ff) stellt ebenso „Möglichkeiten vor, wie quantitative Verfahren sinnvoll in den Prozess der Analyse qualitativer Daten zu integrieren sind.“

4 „Der Typusbegriff bzw. die Typenbildung als Instrument der Klassifikation findet insbesondere in der Psychologie und den Sozialwissenschaften Verwendung, wenn sich die strengen Grenzen der Klassifikationssysteme, insbesondere derer der Naturwissenschaften, für die soziale Realität als unpassend erweisen.“(GRAMZOW et al., 2011). Durch den Typusbegriff werde Objekte kategorisiert, die zwar ähnlich, aber nicht deckungsgleich sind.

Jede Inhaltsanalyse fußt auf Kategorisierung und Kodierung der Daten. Diese Technik ist eine Vorgehensweise, die zunächst Textstellen dekontextualisiert und die Texte zergliedert. Um im Verlauf der Analyse an Orientierungsmuster, wie Typisierungen, zu gelangen, bedarf es einer Re-Aggregation. Jede Kategorie ist dabei Ergebnis einer Klassifizierung von Texteinheiten, wobei diese Kategorisierung, vor allem bei einer hohen Komplexität der Begriffe, einen gewissen Reifegrad in der Auseinandersetzung mit dem Text benötigt. Die Kategorienbildung kann dabei nach KUCKARTZ (2014, S.59ff) theoretisch oder empirisch orientiert sein: „Je stärker die Theorie-Orientierung der Arbeit, desto umfangreicher das Vorwissen, desto genauer die vorhandenen Hypothesen, desto eher wird man vor der Lektüre des erhobenen Materials Kategorien bilden können.“ Häufig gibt es aber Mischformen zwischen deduktiver und induktiver Kategorisierung und die Kategorien werden am Material präzisiert, modifiziert und differenziert. Die Definition einer Kategorie erfolgt durch Beschreibung ihres Inhalts, der Angabe von Indikatoren und Ankerbeispielen. Die Kodierung ist die Zuordnung von Kategorien zu festgelegten Texteinheiten, sie „ist intersubjektiv nachvollziehbar, wenn die Kategorien eindeutig definiert, klar voneinander abgegrenzt und erschöpfend sind.“ (BORTZ und DÖRING, 2006, S.156)

Für die vorliegende Arbeit finden Sie die Bildung der Kategorien im Anhang 34, welche im Split-Half-Verfahren gewonnen wurden. Dafür wurde für jedes einzelne Thema die Hälfte der Antworten zusammenfassend paraphrasiert und Ad-Hoc-Kategorien gebildet. Diese wurden diskursiv unter Spezialisten (Fachdidaktikern) validiert und in der zweiten Hälfte der Antworten auf Gültigkeit getestet und gegebenenfalls modifiziert. Danach wurden diese mit Beschreibungen und Indikatoren zur Abgrenzung versehen und um Ankerbeispiele ergänzt.

Die gebildeten Kategorien strukturieren das Material, erlauben über die Auswertung der Häufigkeit jeder Kategorie eine Skalierung der Wichtigkeit und über Cluster- und Kontingenzanalyse eine Typisierung der Antworten.

Ein wichtiges Gütekriterium für die gewonnene Kategorisierung ist die Interrater-Reliabilität als Übereinstimmung der Rater hinsichtlich der Zuordnung der zu kodierenden Textstellen zu bestimmten Kategorien. Dabei hat sich das Kappa Maß bewährt, welches über die bloße Übereinstimmung zwischen den Beurteilern hinausgeht und diese um zufällig gleiche Urteile korrigiert. Für zwei Rater lautet es:

$$\kappa = \frac{p - p_e}{1 - p_e} \quad (6.1)$$

$$p_e = \frac{1}{n^2} \sum_{j=1}^k f_{j\cdot} \cdot f_{\cdot k} \quad (6.2)$$

wobei p die Übereinstimmung der beiden Beurteiler, p_e eine Schätzung für die zu erwartende zufällige Übereinstimmung und $f_{j\cdot}; f_{\cdot k}$ die Zeilen- bzw. Spaltensummen in der

Kontingenztafel für zwei Beurteiler sind⁵. Eine analoge Erweiterung für mehr als zwei Rater ist Fleiß κ . Laut BORTZ und DÖRING (2006, S.277) erfordert eine gute Übereinstimmung Werte zwischen 0,6 und 0,75. Für die vorliegende Arbeit konnte für die Übereinstimmung der drei Rater zur Einschätzung der Kategorien der Dozenten ein guter Wert von $\kappa_F = 0.7$ ermittelt werden.

Neben dem Finden passender Kategorien und der Erstellung der Kodierung ist der Auswertalgorithmus der dritte wesentliche Bestandteil einer Inhaltsanalyse. Nach KUCKARTZ (2014, S.77ff) und ähnlich bei BORTZ und DÖRING (2006) und MAYRING (2010) gibt es drei Basismethoden der Inhaltsanalyse, die parallel zur Kategorisierung laufen oder sich an diese anschließen:

Inhaltliche Strukturierung Es werden Themen und Subthemen identifiziert, systematisiert und wechselseitige Relationen analysiert. Die Kategorienbildung erfolgt meist mehrstufig, durch generalisierende Paraphrasierung gebildete Hauptkategorien werden am Material ausdifferenziert. In dieser Arbeit werden so die wichtigsten Themen der Dozentenbefragung analysiert

Evaluative Einschätzung Inhalte werden vom Kodierer klassifiziert und bewertet. Dieses Verfahren ist eher hermeneutisch-interpretativ orientiert, die Ausprägung der Kategorien ist meist auf ordinalem Skalenniveau. Der Vorteil gegenüber standardisierten Fragebögen liegt in der korrekten Bewertung von fein nuancierten Antworten.

Typenbildung Der Kern dieser Methode ist die Suche nach mehrdimensionalen Mustern, meist aufbauend auf den beiden anderen Basismethoden. Die Zusammenfassung zu Typen geschieht auf Grund von Ähnlichkeiten in den Merkmalsausprägungen der Objekte als Resultat von Fallvergleichen und -kontrastierung. Grundlegend ist die Bestimmung eines gemeinsamen Merkmalsraumes aus mindestens zwei Merkmalen. Nach Gruppierung der Fälle kann die Typologie beschrieben und Zusammenhänge innerhalb dieser bestimmt werden. Eine Möglichkeit ist die im nächsten Abschnitt beschriebene Clusteranalyse. Ein weiteres Beispiel für die dritte Basismethode ist die Kontingenzanalyse mit Zielen und Themen der Dozenten als Oberkategorien. Hier wird das gemeinsame Auftreten von Kategorien untersucht, d. h. überzufällig häufige oder seltene Kombinationen werden herausgefunden.

Alle diese Methoden werden mit explorativer und heuristischer Intention eingesetzt und nicht, um Signifikanzkoeffizienten zu berechnen oder Theorien zu testen.

6.3.2. Clusteranalyse

Die Clusteranalyse ist nach WOLF und BEST (2010, Kap.21) „ein Verfahren der numerischen Klassifikation für den Fall, dass die Klassen noch nicht (vollständig) bekannt sind und

⁵ genauer bei BORTZ und DÖRING (2006, S.276f)

aus Daten erst konstruiert werden müssen.“ Die Gruppenbildung geschieht dabei im Gegensatz zur Faktorenanalyse auf der Objekt- statt auf der Variablenseite. Sie setzt im Gegensatz zu vielen anderen Untersuchungsmethoden keine Verteilung voraus und ist auch für kleine Stichproben geeignet (KUCKARTZ, 2007, Seite 228). Nach BORTZ und SCHUSTER (2010) werden in der Clusteranalyse „die untersuchten Objekte so gruppiert, dass die Unterschiede zwischen den Objekten einer Gruppe bzw. eines ‚Clusters‘ gering und die Unterschiede zwischen den Clustern möglichst groß sind.“ Dadurch wird eine Typenbildung der Antworten ermöglicht.

Die Bewertung der Ähnlichkeit von Objekten wird mit Merkmalen definiert, die von allen Objekten erhoben wurden. Wichtig ist hierbei, dass alle inhaltlichen Merkmale ausgewogen repräsentiert sind, denn die Dominanz eines Merkmals kann die Clusterbildung enorm verfälschen oder zumindest erschweren. Die Unähnlichkeit der Objekte wird über Distanzmaße repräsentiert.⁶ Diese unterscheiden sich je nach Skalenniveau der untersuchten Merkmale.

Für binäre oder auch dichotom genannte Daten mit 1/0-Kodierung, je nachdem, ob ein Merkmal vorhanden oder nicht vorhanden ist, findet der Jaccard-Koeffizient⁷ als Distanzmaß häufig Anwendung, welcher nur das gemeinsame Auftreten eines Merkmals, die 1 – 1-Kombination, aber nicht das gemeinsame Nichttauftreten 0 – 0 berücksichtigt (WOLF und BEST, 2010, S.537). Seine Berechnung erfolgt über $d_{ij} = \frac{a}{a+b+c}$, wobei a die Anzahl der Merkmale, die bei beiden Objekten ausgeprägt sind, b die Anzahl der Merkmale die nur bei dem zweiten Objekt, c nur bei der ersten und d bei keinem der beiden vorhanden ist. Der Koeffizient d_{ij} kann Werte von 0 bis 1 annehmen und relativiert den Anteil gemeinsam vorhandener Merkmale am Anteil aller Merkmale zwischen zwei Untersuchungsobjekten.

Für die Clusteranalyse in den Testwerten der Evaluation Kapitel IV, S.139 können diese als intervallskaliert angenommen werden, so dass hier die euklidische Metrik als Distanzmaß genutzt wird. Bei p intervallskalierten Merkmalen lautet diese:

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{kj})^2} \quad (6.3)$$

wobei x_{ij} bzw. x_{kj} Merkmalsausprägungen der Objekte i und k auf dem Merkmal j sind. Um Verzerrungen auf Grund unterschiedlicher Skalierungen der Merkmale zu vermeiden, werden diese vor dem Vergleich z-transformiert⁸.

Neben dem Maß für die Distanzen der einzelnen Objekte, werden Berechnungsvorschriften für die Berechnung des Abstandes eines Objektes zu einem Cluster benötigt. Bei den beiden

⁶ Es könnten auch Ähnlichkeitsmaße definiert oder leicht aus den Distanzmaßen berechnet werden, allerdings verwenden die Standardalgorithmen Distanzmaße.

⁷ In der Literatur auch S-Koeffizient genannt.

⁸ Zentrierung der Variable X durch $Z = \frac{X-\mu}{\sigma}$ auf den Erwartungswert 0 und auf die Varianz 1 normiert

im nächsten Abschnitt beschriebenen Verfahren Single- und Complete-Linkage wird dafür jeweils ein spezieller Vertreter des Clusters, beim Ward-Verfahren der Cluster-Mittelpunkt (Zentroid) gewählt.

Das Dendrogramm dient der grafischen Beurteilung einer geeigneten Clusterung und zeigt die Objekte und ihre Distanzen bzw. die Fehlerquadratsumme der Fusionierung beim Ward-Verfahren. Es ist „eine Graphik in Form eines ‚Baums‘, von der sich ablesen lässt, welche Einzelbeobachtungen oder Aggregate bei der sukzessiven Agglomeration in welcher Reihenfolge und gemäß welchen Fusionswerten zusammengefasst werden.“ (WOLF und BEST, 2010, S.531)

Korrelierte Merkmale können die Distanz stärker beeinflussen als unkorrelierte, so dass diese geeignet zusammengefasst, durch rotierende Faktorenanalyse neue, unkorrelierte Merkmale erzeugt oder residualisierte Merkmale durch Herauspartialisieren gemeinsamer Varianzen geschaffen werden sollten (siehe BORTZ und SCHUSTER, 2010, S.457ff für Details). Die geringe Anzahl der Fälle lässt in dieser Untersuchung eine Faktorenanalyse nicht zu. Weiterhin lassen sich die Merkmale durch den explorativen Charakter der Befragung nicht hierarchisieren, was aber für das Herauspartialisieren notwendig wäre, so dass hier die einfache erste Möglichkeit gewählt wurde.

Die Clusteranalyse lässt sich in zwei Gruppen von Algorithmen unterteilen: hierarchische und partitionierende Verfahren.

Hierarchische Clusterung

Hierarchische Verfahren der Clusterung beginnen mit der feinsten Objektaufteilung, bei der jedes Objekt als ein Cluster angesehen wird. Die Abstände der Cluster werden in Matrixform berechnet und diejenigen mit dem nach einem gewissen Kriterium kleinsten Abstand werden fusioniert. Dieser Schritt wird so lange wiederholt bis nur noch ein allumfassender Cluster vorhanden ist, eine vorgegebene Distanz erreicht wird oder die Distanzen zwischen den Clustern sprunghaft⁹ ansteigen. Verfahren, die die Clusterzahl schrittweise verringern, nennt man agglomerativ. Ein Nachteil hierarchischer Verfahren ist, dass die Clusterzugehörigkeit nicht mehr rückgängig gemacht werden kann. Daher ist, sofern möglich, die Partitionierung mit Hilfe nicht-hierarchischer Verfahren, wie im folgenden Abschnitt beschrieben, zu validieren.

Für die vorliegende Arbeit werden folgende Fusionskriterien verwendet:

Single Linkage: Es werden die Cluster fusioniert, deren nächsten Objekte den geringsten Abstand zueinander haben. Der Algorithmus ist für alle, im speziellen auch für binäre, Distanzmaße geeignet, neigt aber zur Kettenbildung, da nur nahe beieinander liegende Einzelobjekte betrachtet werden. Ausreißer, die sich für die Clusterung nicht eignen, werden durch dieses Verfahren gut erkannt, so dass es hier als Prä-Verfahren

⁹ Elbow-Kriterium, nach dem typischen Knick im Diagramm der Distanzen

genutzt wird (siehe auch WOLF und BEST, 2010).

Complete Linkage: Der Algorithmus bestimmt aus den Distanzen für alle Clusterpaare die jeweils am weitesten voneinander entfernten Objekte. Es werden diese Objekte als Cluster zusammengefasst, welche die minimale Maximaldistanz besitzen. Das Verfahren garantiert so homogene Cluster, da alle paarweise Objektdistanzen innerhalb eines Clusters kleiner sind als die paarweisen, durchschnittlichen Abstände der Cluster. Auch hier sind alle, auch nominale, Distanzmaße möglich.

Ward-Verfahren: Diese Methode eignet sich auf Grund der Verwendung euklidischer Distanzen nur für intervallskalierte Merkmale und findet daher in dieser Arbeit nur bei der Clusterung der Testergebnisse im Abschnitt 12.1 der Evaluation Anwendung. Sie vereinigt die Cluster, deren Fusion die Fehlerquadratsumme am geringsten erhöht. Der Fehler berechnet sich analog einer einfaktoriellen Varianzanalyse pro Merkmal mit der Clusterzahl als Treatmentstufe¹⁰ nach

$$\Delta QS_e = \frac{n_i \cdot n_k}{n_i + n_k} \sum_{j=1}^p (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_{kj})^2 \quad (6.4)$$

analog zur Formel 6.3, allerdings mit einer Quadratsumme der Distanzen, mit n_i bzw. n_k als Anzahl der Elemente im Cluster i bzw. k , und \bar{x}_{ij} und \bar{x}_{kj} als durchschnittliche Ausprägung des Merkmals j bei n_i oder n_k Objekten der Cluster i und k . Der Ward-Algorithmus liefert sehr homogene, gleichgroße Cluster und ist nach Monte-Carlo-Studien einer der besten hierarchischen Clusteralgorithmen.

Partitionierende Clusterung

Bei nichthierarchischen Verfahren wird die Anzahl der Cluster und eine inhaltlich plausible Startgruppierung vorgegeben. Die Objekte werden bis zu einem durch Kriterien vorgegebenen Optimum verschoben. Als Startpartition dient meist eine durch ein hierarchisches Verfahren gefundene Clusterung, teilweise mit Wiedereinbeziehung von ausgesonderten Ausreißern, die durch das Partitionierungsverfahren weiter optimiert wird. Die Anwendung des partitionierenden Verfahrens zur Validierung einer hierarchischen Clusterung ist aber nur bei einer großen Anzahl an ausgesonderten Objekten unbedingt notwendig.

Um lokale Optima zu vermeiden, kann es sinnvoll sein, die Anfangsclusterzahl zu variieren. Ein nach BORTZ und SCHUSTER (2010) bewährte Methode ist das k-means-Verfahren, „bei der jedes Objekt demjenigen Cluster zugeordnet wird, zu dessen Zentroid¹¹ die Objektdistanz minimal ist.“, vor allem wenn es als Optimierung einer bereits durch den Ward-Algorithmus gefunden Lösung genutzt wird. Allerdings ist der Algorithmus von der Reihenfolge der Objekte abhängig, so dass die Konvergenz verschiedener Startpartitionen

¹⁰ Details bei (BORTZ und SCHUSTER, 2010, S.462 ff)

¹¹ durchschnittlichen Merkmalsausprägungen aller Objekte eines Clusters, A.des Autors

geprüft werden sollte.

Nach der Berechnung einer Clusterung wird die Einteilung der Gruppen anschließend durch eine Varianzanalyse bestätigt und die Gruppen paarweise durch Post-Hoc-Vergleiche hinsichtlich der Merkmale unterschieden. Ein Maß für den Erfolg der Clusteranalyse stellt neben signifikanten Gruppeneinteilungen mit schlüssiger inhaltlicher Typisierung (siehe auch WOLF und BEST, 2010, S.526f) der Agglomerationskoeffizient α dar, der beschreibt, wie gut sich die Daten in die Cluster einteilen lassen (HATZINGER et al., 2011, S.425).

7. Auswertung und Ergebnisse

Ein Test über quantenphysikalische Konzepte an den Teilnehmern der Pilotstudie lieferte ähnliche Resultate wie die Referenzstudien (ROBERTSON und KOHNLE, 2010; BAILY und FINKELSTEIN, 2009). Gegensätze von klassischer Physik und Quantenmechanik, z. B. im EPR-Experiment, konnten oft nicht genannt werden. Die Erklärung von quantenmechanischen Begriffen Nichtdeterminismus und Verschränkung, Energiemessung oder Kollaps der Wellenfunktion fiel den Studenten schwer. Dieser kleine, explorative Test ließ eine genauere Untersuchung der Verbesserungsmöglichkeiten in der Quantenphysikausbildung zukünftiger Lehrer notwendig erscheinen, wozu zunächst Anforderungen von Studenten und Dozenten an die akademische Ausbildung ermittelt wurden.

Die Analyse der studentischen Anforderungen an die quantenphysikalische Ausbildung gliedert sich in die Darstellung der wahrgenommenen Vorlesungsinhalte, deren Korrelation untereinander und der Bildung von Gruppen im Hinblick auf die unterschiedliche Wahrnehmung von Inhalte der Lehrveranstaltungen. Diese Gruppen wurden mit Methoden der Clusteranalyse identifiziert. Durch die genaue Auswertung der Basisinhalte der Vorlesungen kann deren Struktur erkannt und das zu konzipierende Seminar an die sich daraus ergebenden spezifischen inhaltlichen Anforderungen angepasst werden. Es folgt die studentische Selbsteinschätzung der eigenen fachlichen und fachdidaktischen Kompetenzen, welche dann im Kapitel IV mit den Leistungstest-Ergebnissen der Seminarteilnehmer in Beziehung gesetzt werden. Die Anforderungen an ein fachdidaktisches Seminar zur Quantenphysik, sowie die Beurteilung geeigneter Schulinhalte durch die Studenten werden analysiert und verschiedenen Anforderungsprofilen zugeordnet.

Die Analyse der Lehrperspektive beginnt mit der Untersuchung des Spannungsfeldes zwischen Zielen der Lehrveranstaltung und den tatsächlich behandelten Themen, dabei treten die Themen und Ziele in verschiedenen Gruppierungen auf, welche durch die Kontingenzanalyse der qualitativen Kategorien sichtbar gemacht werden können. Dies schließt auch die qualitative und quantitative Analyse der diesen Zielen entgegenstehenden Hindernisse ein. Eng damit verbunden ist die Darstellung der vermittelten Kompetenzen aus Dozentensicht, wobei sich mit Hilfe der Clusteranalyse drei typische Gruppen unterscheiden lassen. Abschließend erfolgt die Beurteilung quantenphysikalischer Konzepte auf ihre Wichtigkeit durch die Dozenten. All diese Untersuchungen liefern wertvolle Hinweise, wie die Ausbildung der zukünftigen Lehrer in der Quantenphysik durch ein fachdidaktisches Seminar ergänzt werden kann.

7.1. Anforderungsanalyse Studenten

7.1.1. Wahrgenommene Vorlesungsinhalte

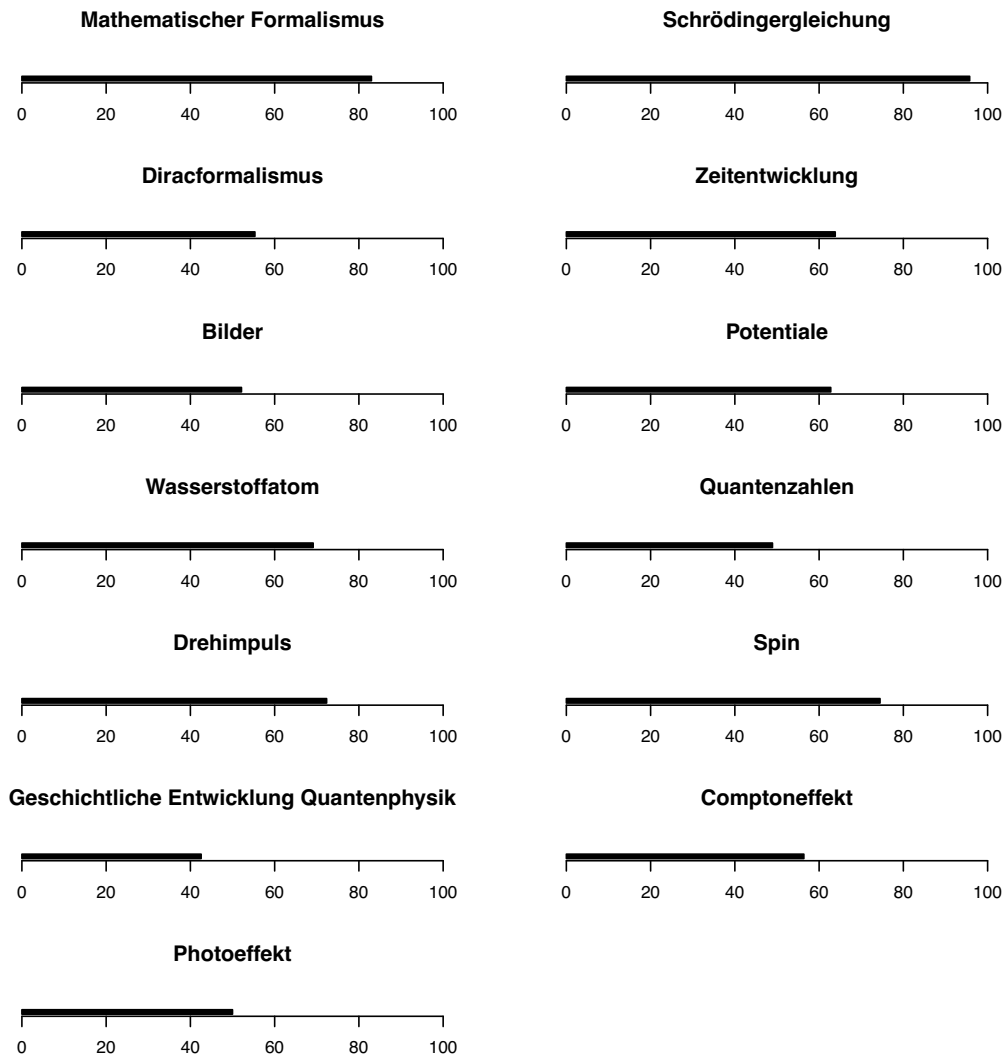


Abbildung 7.1.: Prozentanteile der von Studenten wahrgenommenen Vorlesungsinhalte

Die von den Studenten wahrgenommenen Vorlesungsinhalte sind in Abbildung 7.1 prozentual dargestellt. Nahezu immer sind formale Aspekte wie die Behandlung des mathematischen Formalismus und der Schrödingergleichung in den Vorlesungen vorhanden. Der Diracformalismus hat in knapp 60 % der untersuchten Vorlesungen einen hohen Stellenwert, der Rest teilt sich in alternative Darstellungen, beispielsweise als komplexe Welle, auf. Eng mit der Schrödingergleichung verbunden sind die, in über 60 % der Vorlesungen vorhandene, Zeitentwicklung und in 50% der Fälle die verschiedenen Bilder im Diracformalismus, wie

Schrödinger- und Heisenbergbild. Eine typische, sehr einfache Anwendung der Schrödinger-Differenzialgleichung sind Potenziale, z.B. Kastenpotenziale, die in mehr als sechs von zehn Vorlesungen einen festen Platz haben. Mathematisch schwieriger ist die theoretische Behandlung des Wasserstoffatoms mit Kugelflächenfunktionen und Laguerre-Polynomen als komplexe Gebilde. Sie werden in 70 % der Vorlesungen erörtert. In enger Verbindung stehen die Quantenzahlen, die in der Hälfte der Vorlesungen wahrgenommen werden. Zu den anspruchsvollen Themen gehören Drehimpuls und Spin, die mit reichlich 70 % sehr häufig in den Vorlesungen vorkommen, häufig aber von Lehramtsstudenten als nicht schul-relevant wahrgenommen werden. Die Geschichte der Quantenphysik nimmt mit reichlich 40 % einen niedrigen Anteil ein. Sowohl Compton- als auch der Photoeffekt nehmen mit 50 % einen geringen Anteil ein, in der Schule hingegen sind sie häufig behandelte Themen.

Die wahrgenommenen Vorlesungsinhalte sind, wie in Tabelle 7.1 ersichtlich, häufig gering miteinander korreliert, einzelne Inhalte treten jedoch vermehrt zusammen auf: Sowohl der *Photo- und Compton-Effekt* als auch *Spin*, *Drehimpuls* und *Wasserstoff* sind stark, *mathematischer Formalismus* und *Schrödingergleichung* sowie *Diracformalismus* und *Zeit-entwicklung* im mittleren bis starken Bereich miteinander korreliert¹. Diese Themen wurden für die folgende, genauere Untersuchung mittels Clusterung zusammengelegt.

Eine Typisierung der wahrgenommenen Inhalte zeigt eine Clusteranalyse. Zur Verbesserung des eigentlichen Complete-Clusterverfahren wurde zuvor im Single-Verfahren im Dendrogramm der Abb. 7.2 die drei Ausreißer mit der ID 68, 89 und 92 identifiziert und entfernt.

In der Auswertung der Clusteranalysen mit einer sehr guten Agglomeration von $\alpha = 0.95$ zeigen sich bei den wahrgenommenen Vorlesungsinhalten drei wesentliche Typen. Das zugehörige Dendrogramm ist in Abbildung 7.3, die zugehörigen Gruppen in Tabelle 7.3 zu sehen. Die Gruppentrennung wurde durch eine Varianzanalyse mit anschließendem multiplen Paarvergleich validiert².

Zum einen gibt es mit 4% eine sehr kleine Gruppe der *Formalisten*, die im Fokus der Vorlesungen nur die in allen Gruppen dominierende Themen mathematischen Formalismus und Schrödingergleichung sieht und die anderen Themen nur als wenig präsent in den Vorlesungen wahrgenommen. Die beiden anderen, etwa gleich großen Gruppen von Lehrenden sind aus Studentensicht zum einen anwendungs-, zum anderen theorieorientiert. Erstere behandelt den Diracformalismus mit Zeitentwicklung und die verschiedenen Bilder überdurchschnittlich oft, die anderen Themen durchschnittlich und den Compton- und Photoeffekt, sowie Quantenzahlen nur wenig. Die zweite Gruppe steht im Gegensatz dazu und behandelt stark Drehimpuls, Spin und Wasserstoff und könnte daher als *Anwender-Atomphysik* bezeichnet werden. Die Behandlung der Geschichte ist in allen Gruppen etwa gleich präsent.

¹ Einordnung der Korrelationen nach RASCH et al. (2010, S.133)

² Diese Analysen befinden sich im Anhang 16 auf Seite 215

Tabelle 7.1.: Korrelation der Vorlesungsinhalte, signifikante große Korrelationen sind fett gedruckt (siehe RASCH et al., 2010, S.133)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 Diracformalismus												
2 Schrödingergleichung	0.23*											
3 Mathm. Formalismus	0.39***	0.47***										
4 Geschichte	0.04	0.07	-0.01									
5 Compton-Effekt	-0.06	-0.08	-0.17	0.24*								
6 Photoeffekt	-0.11	-0.10	-0.27**	0.24*	0.81 ***							
7 Bilder	0.30**	0.01	0.13	0.01	0.02	0.04						
8 Zeitenwicklung	0.48***	0.28**	0.54 ***	0.02	-0.04	-0.16	0.25*					
9 Wasserstoff	-0.04	0.20	0.07	0.06	0.43***	0.36***	0.01	0.07				
10 Quantenzahlen	-0.06	0.00	-0.07	0.36***	0.43***	0.45***	-0.04	-0.06	0.24*			
11 Potentiale	0.10	0.06	0.12	0.35***	0.17	0.30**	0.14	0.20	0.15	0.45***		
12 Drehimpuls	0.16	0.22*	0.23*	0.15	0.22*	0.20*	0.26*	0.23*	0.51 ***	0.32**	0.36***	
13 Spin	0.16	0.12	0.19	0.16	0.22*	0.16	0.22*	0.22*	0.51 ***	0.33**	0.26*	0.84 ***

. p<0.1 * p<0.05 ** p<0.01 *** p<0.001

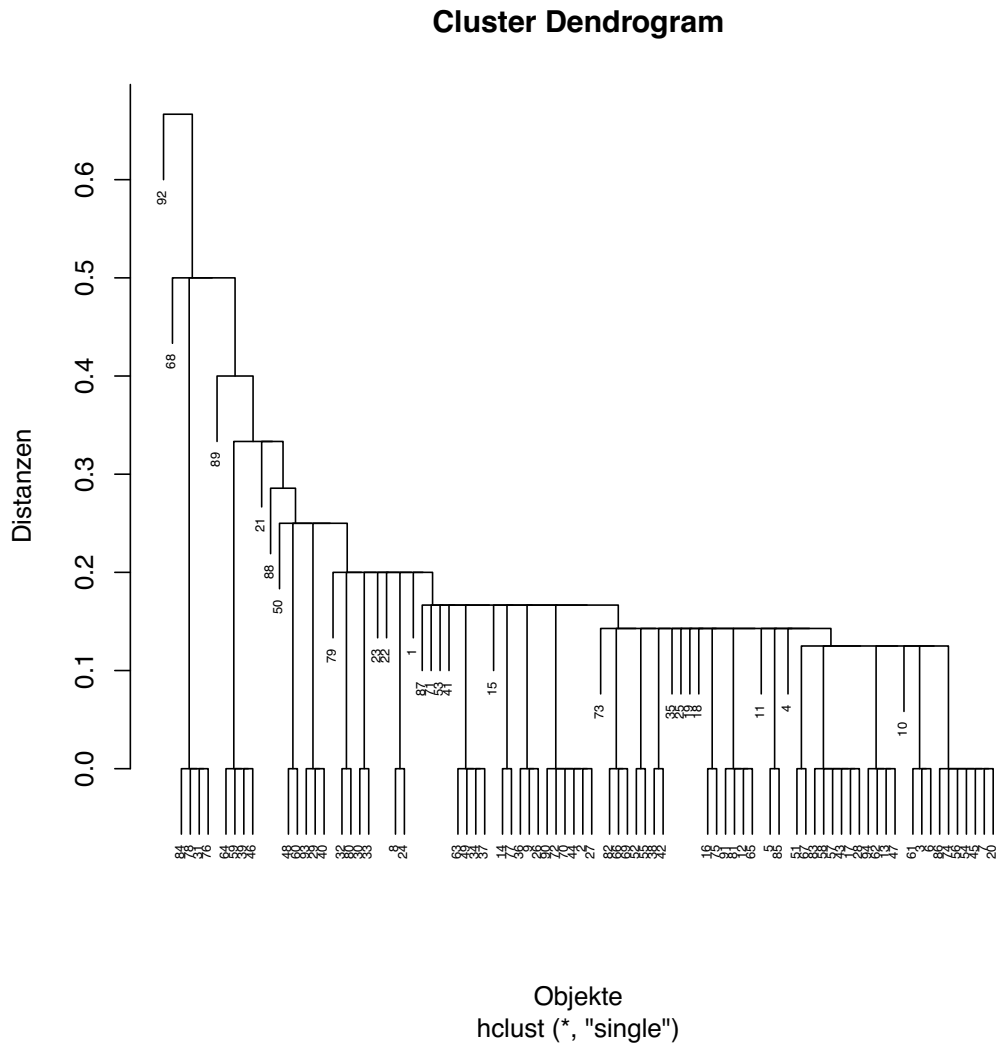


Abbildung 7.2.: Vorlesungsinhalte - Dendrogramm der Clusteranalyse im Single-Linkage-Verfahren

Tabelle 7.2.: Die drei Gruppen der Clusteranalyse zu wahrgenommenen Vorlesungsinhalten

	Gesamtmittelwerte	Mittelwerte 1	Mittelwerte 2	Mittelwerte 3
Diracformalismus/Zeitentw.	0.75	0.98	0.60	0.00
Math. Formalismus/Schrödingergl.	0.98	1.00	0.96	1.00
Geschichte	0.43	0.43	0.47	0.00
Compton-& Photoeffekt	0.58	0.33	0.87	0.00
Bilder	0.53	0.74	0.38	0.00
Quantenzahlen	0.51	0.24	0.80	0.00
Potentiale	0.65	0.64	0.71	0.00
Drehimpuls/Spin/Wasserstoffatom	0.85	0.83	0.93	0.00

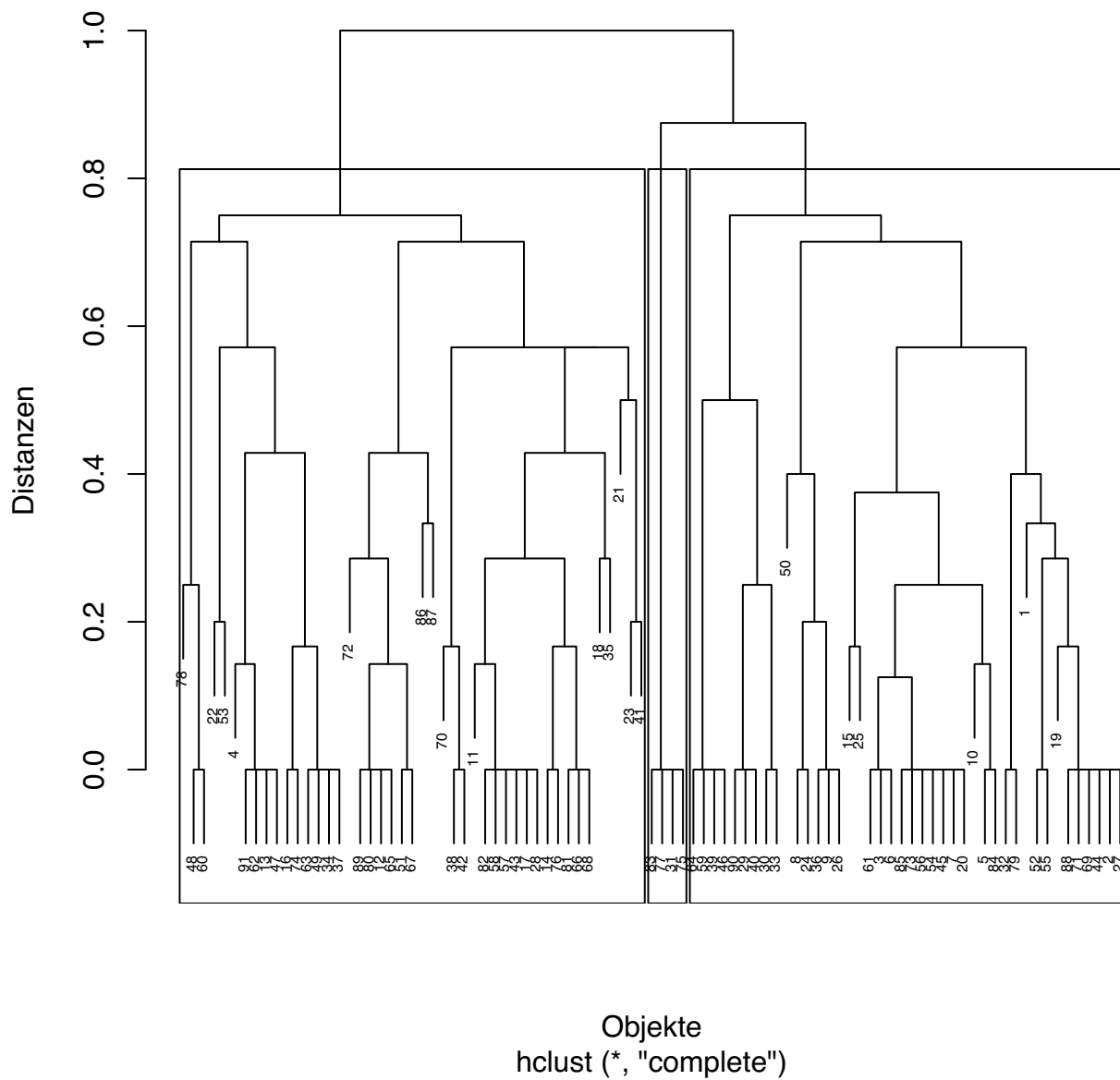


Abbildung 7.3.: Vorlesungsinhalte - Dendrogramm der Haupt-Clusteranalyse im Complete-Linkage-Verfahren mit drei identifizierten Gruppen (graue Rechtecke, Labels wurde für die Übersichtlichkeit entfernt)

Tabelle 7.3.: Vergleich der in der Clusteranalyse ermittelten Gruppen mit Gruppengröße hinsichtlich der wahrgenommenen Vorlesungsinhalte

Vorlesungsinhalte	1 Theorieorientierte (46%)	2 Anwender-Atomphysik (49%)	3 Formalisten(4%)
Diracformalismus/Zeitentwicklung	↑	↓	↓
Math.Formalismus/Schrödingergl.	→	→	→
Geschichte	→	→	↓
Compton- & Photoeffekt	↓	↑	↓
Bilder	↑	↓	↓
Quantenzahlen	↓	↑	↓
Potenziale	→	→	↓
Drehimpuls/Spin/Wasserstoff	→	→	↓

↓ geringe Ausprägung

→ durchschnittliche Ausprägung

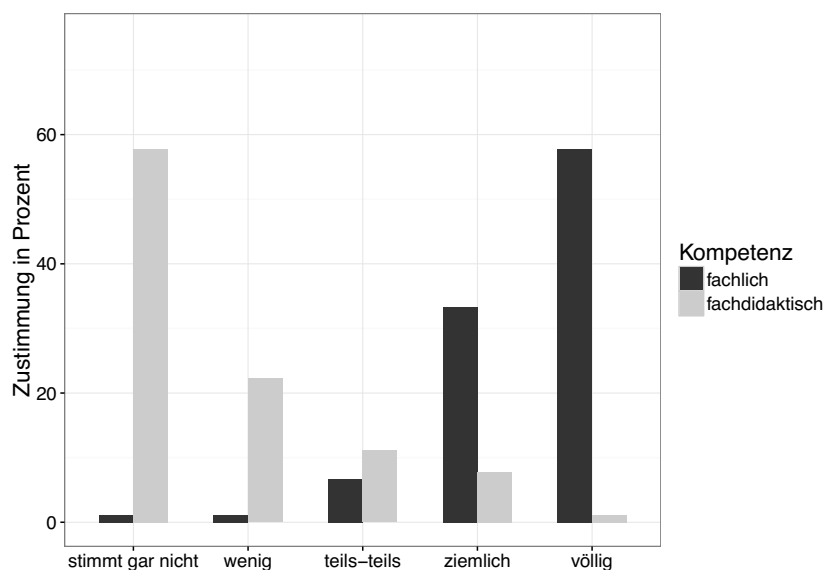
↑ hohe Ausprägung

Tabelle 7.4.: Unterschiede in den drei Cluster-Gruppen hinsichtlich wahrgenommener Vorlesungsinhalte

Vorlesungsinhalt	ANOVA	zugehöriger Post-Hoc-Test
Diracformalismus/Zeitentwicklung	***	1-2***, 1-3***, 2-3*
Math.Formalismus/Schrödingergl.	-	-
Geschichte	-	-
Compton-&Photoeffekt	***	1-2***, 2-3***
Bilder	***	1-2***, 1-3**
Quantenzahlen	***	1-2***, 2-3***
Potenziale	*	1-3*, 2-3**
Drehimpuls/Spin/Wasserstoff	***	1-3***, 2-3***

· p<0.1 * p<0.05 ** p<0.01 *** p<0.001

7.1.2. Studentische Selbsteinschätzung der Kompetenzen

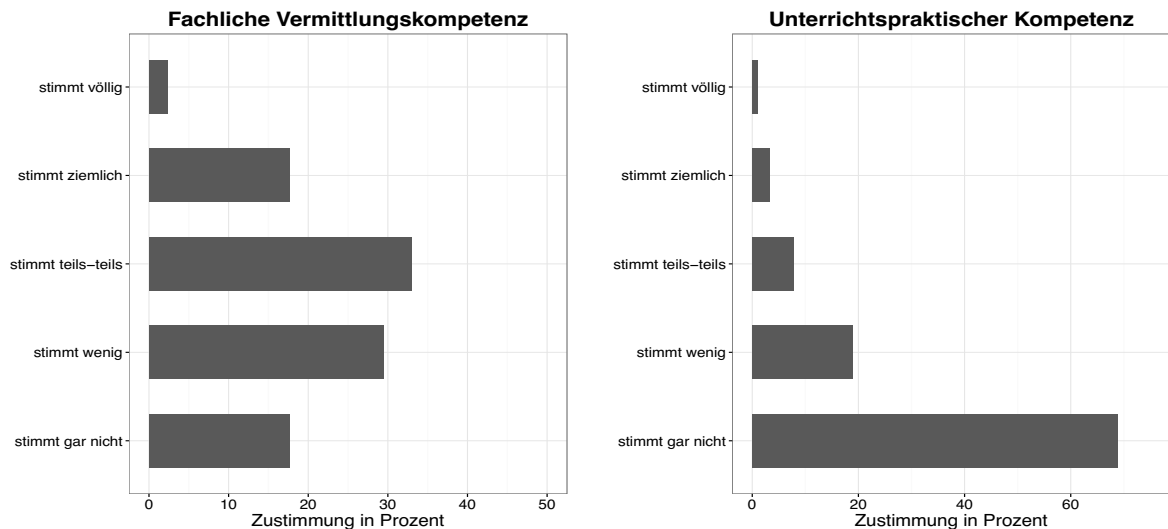
Abbildung 7.4.: Studentische Einschätzung der **vermittelten Kompetenz 1**

In Abbildung 7.4 ist die Selbsteinschätzung der Studenten hinsichtlich vermittelter fachlicher und fachdidaktischer Kompetenzen am Ende der theoretischen Ausbildung in der Quantenphysik zu sehen. Es fällt auf, dass die eigenen fachlichen Fähigkeiten überwiegend als gut, die fachdidaktischen hingegen als unzureichend betrachtet werden.

Dies ist für die fachlichen Fähigkeiten erfreulich, wirft aber die Frage nach dem Transfer in die Schulpraxis auf: Siebenundvierzig Prozent der zukünftigen Lehrer können der Aussage nicht zustimmen, dass die fachliche Ausbildung genügt, um Quantenphysik realitätsnah und aktuell in der Schule vermitteln zu können (Siehe Abbildung 7.5 links). Die Vermittlung unterrichtspraktischer Fähigkeiten spielt praktisch keine Rolle (Siehe Abbildung 7.5 rechts), die aber einen großen Bereich der fachdidaktischen Kompetenz ausmachen.

Insgesamt ähneln die Antworten der methodisch ähnlich gelagerten Studie von KREUTZMANN (2003). Bei ihr wurden allerdings Referendare aller Fächerkombinationen befragt: Die Befragten fühlen sich mit Abstrichen fachlich gut, fachdidaktisch aber weniger gut vorbereitet. Sie haben eine kritische Sicht auf die vermittelten fachdidaktischen Kompetenzen, 60 % nehmen diese als *nicht* oder *gar nicht* vermittelt wahr. Hingegen liefert die Vermittlung der fachwissenschaftlichen Kompetenz durchgehend ein positives Bild.

Zu vergleichbaren Ergebnissen kommt die Studie von HILFERT-RÜPPEL et al. (2012). Für diese wurden 232 Referendare aus allen Naturwissenschaften zu ihrer Studienzeit befragt. Sie stellt eine Bewertung der Qualität der ersten Studienphase aus Sicht der zweiten dar. Es zeigt sich eine kritische Sicht auf die vermittelten fachdidaktischen Kompetenzen, es „gaben 58,8 % der Befragten an, dass diese ‚eher nicht‘ und ‚gar nicht‘ erfolgt war.“ Die

Abbildung 7.5.: Studentische Einschätzung der **vermittelten Kompetenz 2**

vermittelte fachwissenschaftliche Kompetenz wird allerdings durchweg positiv beurteilt (82,8 % mit recht bis sehr gut). Die Gymnasial-Referendare der Physik wünschen sich einen hohen fachwissenschaftlichen Anteil, der derzeitige Stand von 90:10 sollte aber auf 70:30 zu Gunsten der Fachdidaktik und Pädagogik korrigiert werden. Die fachdidaktischen Veranstaltungen werden gut beurteilt. Trotz guter Einschätzung der theoretischen Darstellung in der Fachdidaktik wird der unterrichtspraktische Nutzen im Referendariat als gering eingeschätzt. Das ist ein Hinweis auf die Verbesserungsmöglichkeit der universitären Ausbildung durch einen höheren Praxisbezug, zumal dieser in einem gesonderten Item (HILFERT-RÜPPEL et al., 2012, S.161 und 166) von den Referendaren angemahnt wird. Alle drei Studien zeigen damit die Notwendigkeit die Praxisrelevanz der fachdidaktischen Ausbildung zu erhöhen.

Selbsteinschätzungen sind natürlich immer mit Vorsicht zu genießen, allerdings zeigen BAER et al. (2007), dass Referendare eine realistische Selbsteinschätzung ihres Kompetenzniveaus, -entwicklungsstandes und -potenzials geben können. Allerdings können nach dem universitären Abschluss die Kompetenzen noch nicht vollständig ausgebildet sein, anschlussfähige Grundlagen in Kenntnissen und Fähigkeiten müssen aber das Ziel sein.

7.1.3. Anforderungen an ein Zusatzseminar

Nach Vorstellung der wahrgenommenen Aspekte der Vorlesung stellt sich die Frage, welche Inhalte ergänzt werden müssen, um zum einen den fehlenden Transfer des fachlichen Wissens in den Aufbau schulrelevanten, fachlichen Wissens zu ermöglichen und zum anderen das notwendige fachdidaktische Grundgerüst für die Konzeption von Unterricht und das Erkennen von Schülervorstellungen aufzubauen. Die Antworten der Studenten sind in Abbildung 7.6 dargestellt.

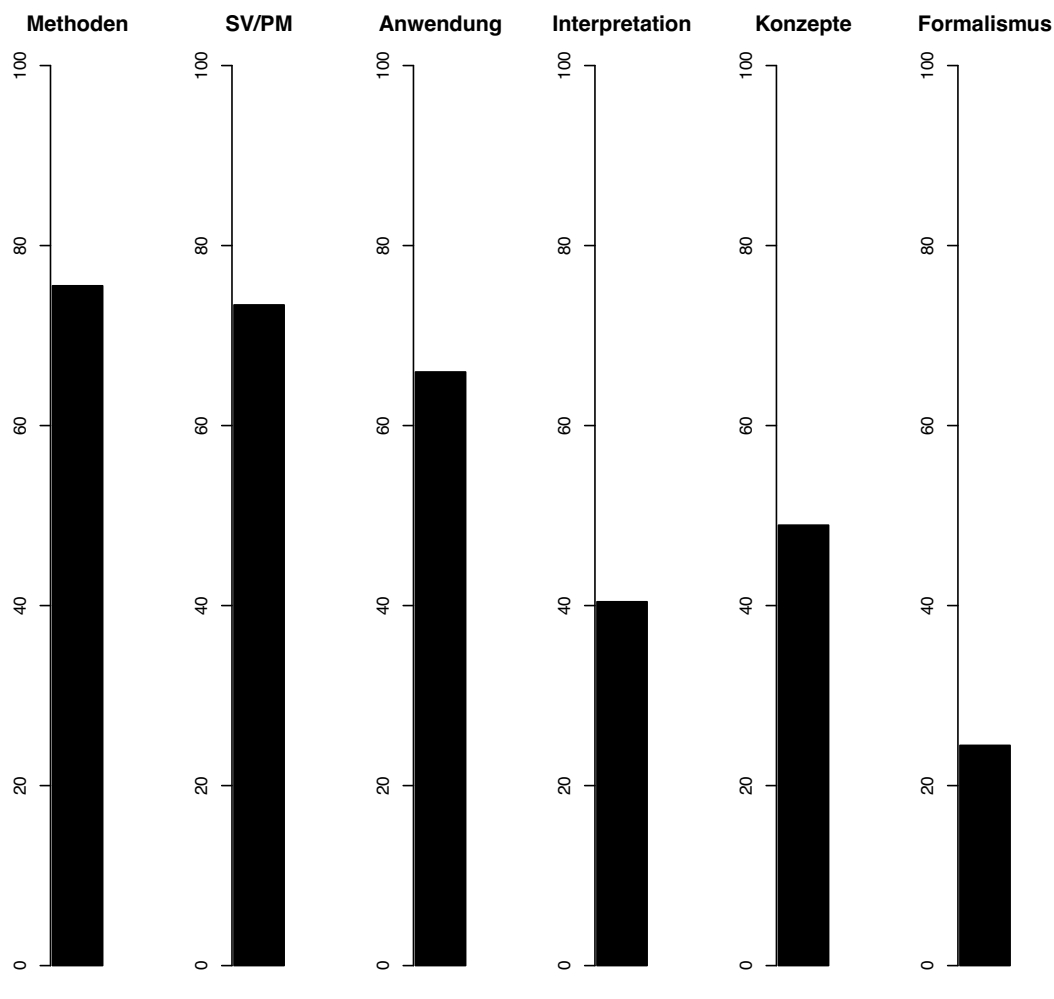


Abbildung 7.6.: Gewünschte Inhalte des Zusatzseminars, SV Schülervorverständnis, PM physikalische Modellbildung

Die Befragten legen besonders Wert auf unterrichtspraktische Methoden und fachdidaktische Fragestellungen, wie die Behandlung von Schülervorstellungen oder der physikalischen

Modellbildung. Gestützt wird diese Präferenz durch ein weiteres Frageitem, welches die Studenten die Bedeutung konzeptioneller Ideen zur Planung eines Unterrichtsganges einschätzen lässt: 73 Prozent stimmen diesen ziemlich oder völlig als Thema der Hochschulausbildung zu. Dies deckt sich mit dem Ergebnis der Befragung von KREUTZMANN (2003) und SCHUMACHER und LIND (2000), dass Lehramtsstudenten eine sehr praxisorientierte Fachdidaktik bevorzugen. Hinzu kommen als dritter Punkt wichtige Anwendungsbeispiele, welches einfache Modellsysteme, Experimente und Analogien einschließen. Die Interpretation der Quantenphysik fällt im Vergleich etwas zurück, wird aber annähernd von 40 % der Studenten als wichtiger Punkt eines didaktischen Seminars angesehen. Die Konzepte der Quantenphysik haben im Vergleich dazu mit 53 % einen höheren Stellenwert bei den Lehramtsanwärtern. Der Formalismus ist nur für jeden Vierten für ein fachdidaktisch orientiertes Seminar relevant. Dies wird durch ein gesondert erhobenes Item, dass nach mathematischer Unterstützung fragt, bestätigt: 61 Prozent lehnen eine Förderung in dieser Frage, zumindest teilweise, ab. Dies kann so interpretiert werden, dass Konzepte in formaler Hinsicht von den Studenten als weitestgehend bekannt angesehen werden, es aber trotzdem Bedarf an Interpretation und konkreten Anwendungsbeispielen, vor allem auch beim Erkennen von themenbezogenen Schülervorstellungen und Anleitung zur unterrichtspraktischen Umsetzung gibt. Laut LEVRINI et al. (2008, S.323) gilt für das studentische Verhältnis zum Formalismus: „In particular, for most of the students, the formalism does not provide by itself all the knowledge resources for answering to the main questions arisen by QP, e.g. what they call ‚the knowledge problem‘ which arose in the fall of determinism.“, d.h. der Formalismus wird von vielen Studenten als notwendig, aber nicht hinreichend für ein umfassendes Verständnis der Quantenphysik angesehen.

Eine genauere Analyse der gewünschten Zusatzinhalte liefert eine Clusteranalyse im Complete-Linkage-Verfahren, wieder mit anschließender Validierung der Gruppen durch eine Varianzanalyse und multiplen Paarvergleich³.

Für die Eignung dieser Fragestellung für die Clusterung müssen die Korrelationen der Anforderungen untereinander kontrolliert werden: Das methodische Wissen und originär fachdidaktische Fragestellungen, wie Schülervorstellungen oder physikalische Modellbildung korrelieren höchst signifikant miteinander und werden für die folgende Clusteranalyse zu einem Punkt fusioniert. Theorieorientierte als auch schulpraktische Themen der Fachdidaktik werden als zusammengehörig empfunden. Die Themen Interpretation und Grundideen werden auch häufiger zusammen als Inhalte vorgeschlagen, sind aber nur leicht korreliert und werden daher getrennt belassen.

³ Die letzten beiden Analysen befinden sich im Anhang 17 auf Seite 219

Tabelle 7.5.: Korrelation der gewünschten Zusatzinhalte untereinander, signifikante mittlere und starke Korrelationen sind fett gedruckt (siehe RASCH et al., 2010, S.133)

	1	2	3	4	5
1 Unterrichtspraktische Methoden					
2 Anwendungen/Beispiele	0.16				
3 Fachdid.Fragen	0.42***	0.18			
4 Grundideen	-0.09	0.11	-0.08		
5 Interpretation	0.00	-0.11	-0.12	0.32**	
6 Mathematischer Formalismus	-0.12	0.04	-0.14	0.10	0.05

. p<0.1 * p<0.05 ** p<0.01 *** p<0.001

Für die bessere Gruppierung im eigentlichen Clusterverfahren wurden die Objekte 1, 51 und 80 (Siehe Abb. 7.7) als Ausreißer in der Single-Linkage-Clusterung mit zu hoher Distanz zu den anderen Objekten von der Hauptanalyse ausgenommen.

Tabelle 7.6.: Die vier Gruppen der Clusteranalyse zu gewünschten Zusatzinhalten

	Gesamtmittelwerte	Mittelwerte 1	Mittelwerte 2	Mittelwerte 3	Mittelwerte 4
Anwendungen/Beispiele	0.73	1.00	0.00	0.80	0.33
Methoden/Fachdid.Fragen	0.95	1.00	1.00	0.80	0.00
Grundideen/Konzepte	0.54	0.55	0.32	1.00	1.00
Interpretation	0.44	0.42	0.53	0.00	1.00
Math. Formalismus	0.23	0.22	0.11	1.00	0.00

Bei der Hauptclusterung in Abb. 7.8 zeigen sich vier verschiedene Gruppen, zwei nur sehr kleine Gruppen mit 6 und 4 %, eine mit 23 % mittelgroße Gruppe und eine Hauptgruppe, welche zwei Drittel der Befragten umfasst. Die kleinen Gruppen sind sehr charakteristisch: Befragte der Gruppe 4 können als *Konzeptionalisten* bezeichnet werden, da sie sehr viel Wert auf die Konzepte und Interpretation der Quantenphysik legen und die anderen Bereiche als nicht wichtig für das Zusatzseminar ansehen. Die Gruppe 3 der *Formalisten* unterscheidet sich hiervon, weil die Interpretation als unwichtiger und vielmehr der Formalismus als sehr wichtig erachtet wird. Die beiden größeren Gruppen unterscheiden sich signifikant nur in dem Interesse an Anwendungen und Beispielen, ansonsten sind beide sehr durchschnittlich an den anderen Inhalten interessiert.

Insgesamt bestätigt sich hierdurch der hohe Bedarf an fachdidaktischen, insbesondere methodischen, Fragestellungen, gefolgt von Anwendungen/Beispielen und grundlegenden Konzepten. Die Interpretation ist weniger für die Studenten interessant, aber dennoch für einen Großteil wichtig. Nur der mathematische Formalismus zeigt sich als wenig relevant für die Studenten.

Die Agglomeration ist bei dieser Clusterung mit einem Agglomerationskoeffizienten von

Tabelle 7.7.: Vergleich der Gruppen mit Gruppengröße hinsichtlich der gewünschten Zusatzinhalte

Zusatzinhalte	1 Anwender (67%)	2 Didaktiker (23%)	3 Formalisten (6%)	4 Konzeptionalisten (4%)
Anwendungen/Bsp.	↑	↓	→	↓
MethodenFachdid.	→	→	↓	↓
Grundideen/Konzepte	→	↓	↑	↑
Interpretation	→	→	↓	↑
Math. Formalismus	→	→	↑	↓

↓ geringe Ausprägung

→ durchschnittliche Ausprägung

↑ hohe Ausprägung

Tabelle 7.8.: Unterschiede in den Gruppen hinsichtlich gewünschter Zusatzinhalte

Zusatzinhalte	ANOVA	zugehöriger Post-Hoc-Test
Anwendungen/Beispiele	***	1-2/1-4/2-3***, 1-3**, 2-4*
Methoden/Fachdid.Fragen	***	1-4/2-4***, 1-3**
Grundideen/Konzepte	**	2-3*
Interpretation	*	3-4*
Mathematischer Formalismus	***	1-3/2-3***, 3-4**

· p<0.1 * p<0.05 ** p<0.01 *** p<0.001

$\alpha = 0.99$ als sehr gut zu bezeichnen. Wie die Tabelle 7.8 zeigt trennen die Gruppen ebenfalls sehr gut in der Varianzanalyse bzw. in den zugehörigen Post-Hoc-Tests. Nur in den Konzepten und der Interpretation der Quantenphysik sind sich die Befragten zu ähnlich, um besser zu differenzieren.

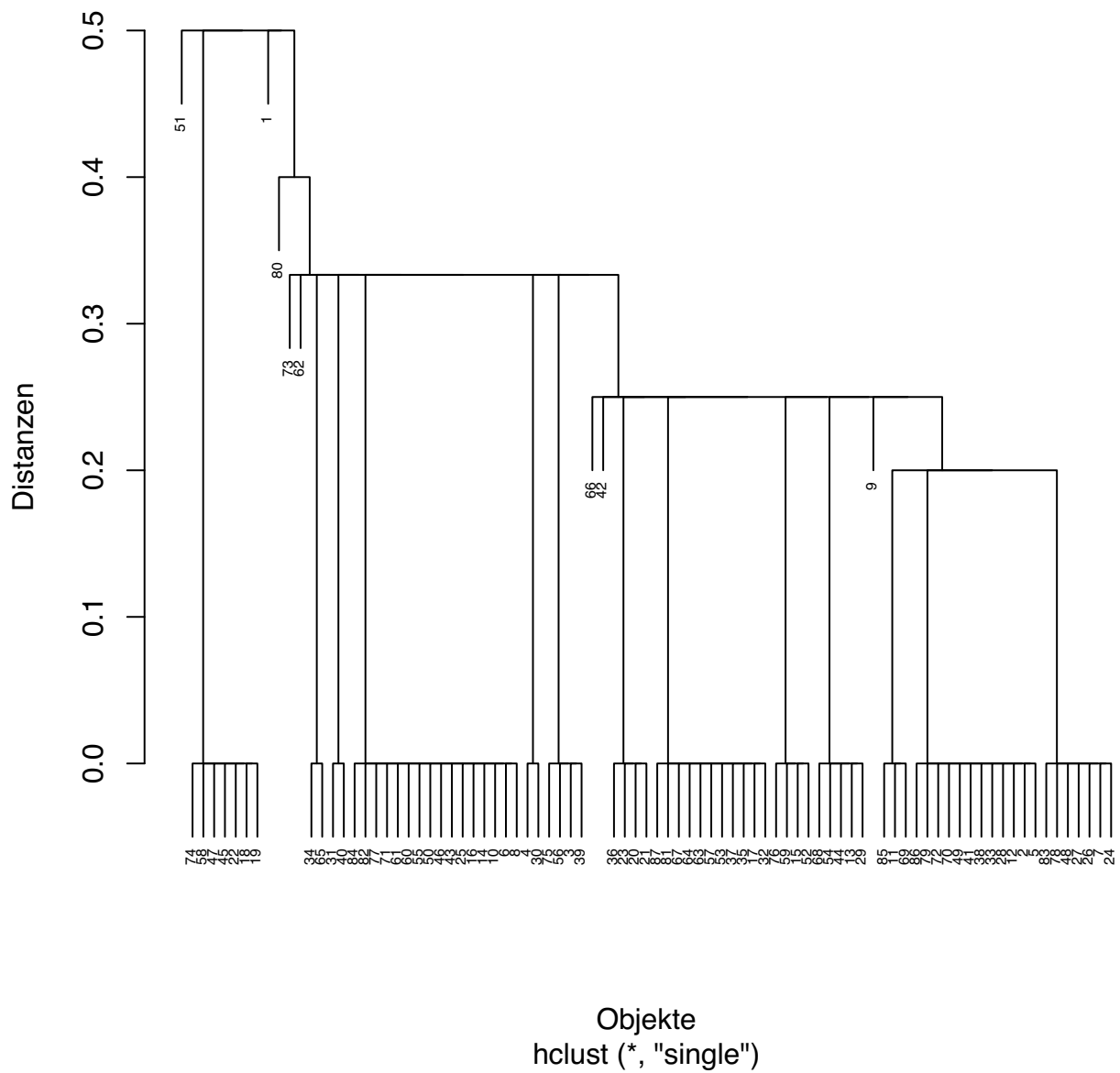


Abbildung 7.7.: Zusatzinhalte - Dendrogramm der Clusteranalyse im Single-Linkage-Verfahren

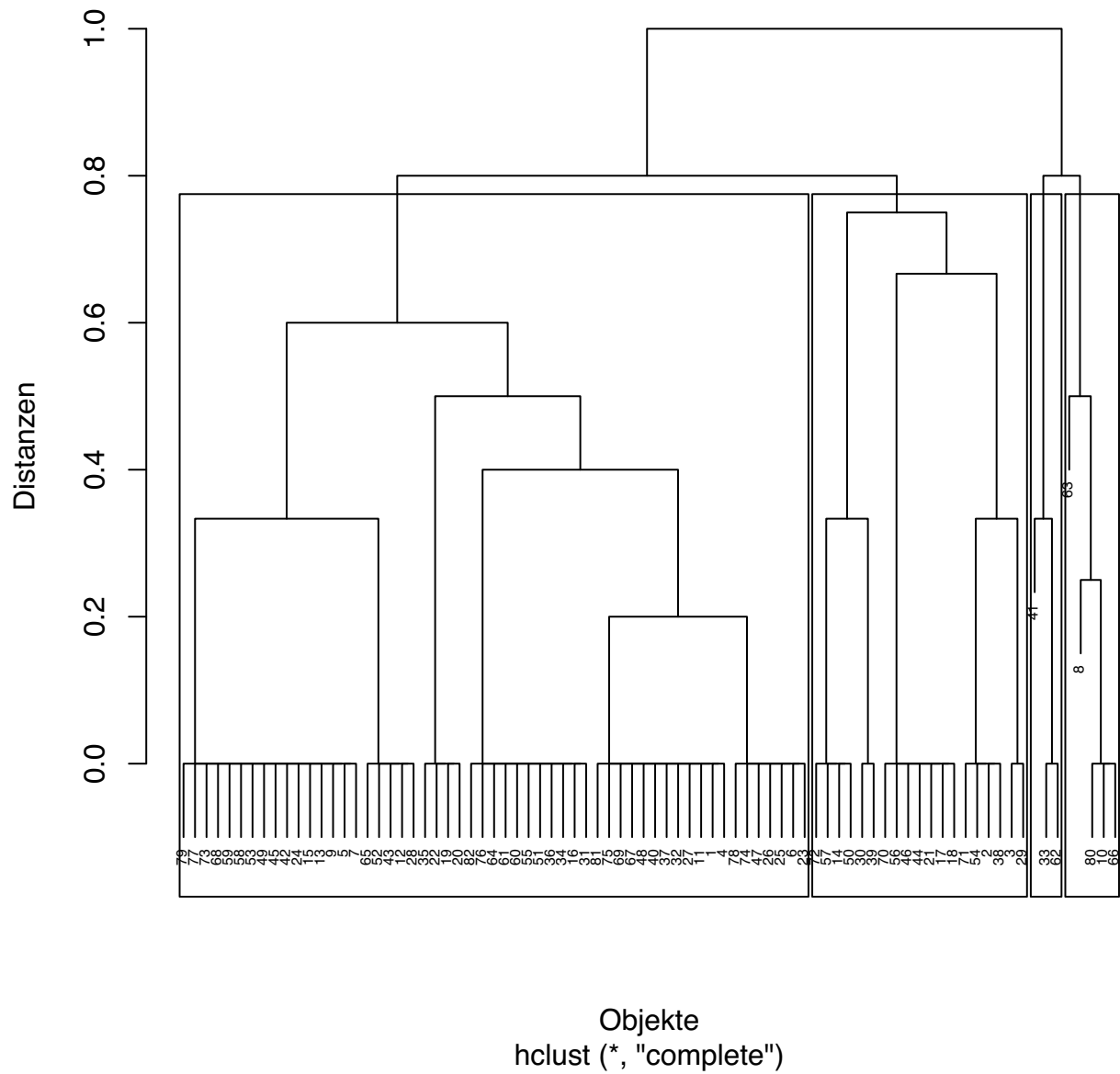


Abbildung 7.8.: Zusatzinhalte - Dendrogramm der Clusteranalyse im Complete-Linkage-Verfahren mit Gruppenzuordnung

7.1.4. Geeignete Schulinhalte

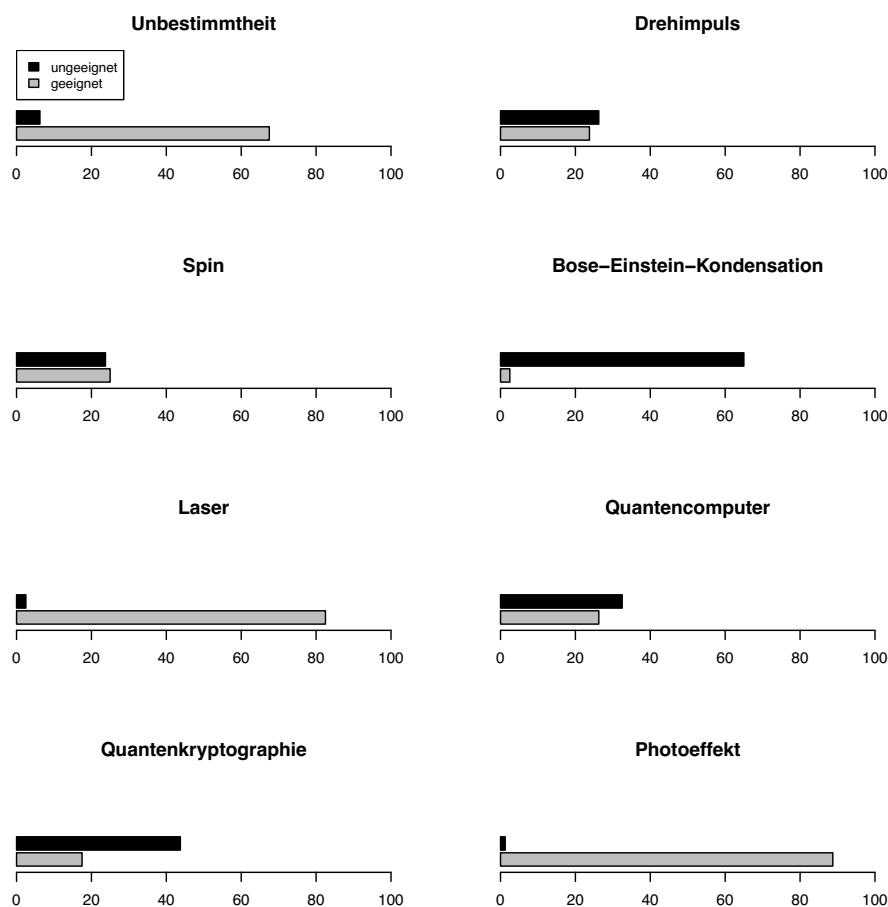


Abbildung 7.9.: Geeignete Schulinhalte

Welche Inhalte werden von den befragten Studenten als für die Schule relevant angesehen? Einen Überblick über die Antworten geben die Abbildungen 7.9 und 7.10, dabei wurde zur Absicherung der Antworten explizit nicht nur nach geeigneten, sondern auch nach ungeeigneten schulischen Themen gefragt.

Generell sind Konzepte für die Studenten entscheidend, 72,5 Prozent sehen die Behandlung von Grundkonzepten als geeignetes Vorgehen an, keiner hingegen hält sie für ungeeignet. Allerdings zeigen sich starke Unterschiede, welche Konzepte als wichtig und welche als weniger relevant für den Unterricht erachtet werden.

Hinsichtlich relevanter Unterrichtsinhalte nennen die befragten Studenten die Behandlung der Unbestimmtheitsrelation, Anwendungen des Lasers, Photo- und Comptoneffekt, Welle-Teilchen-Dualismus und Interferenz als geeignete Themen, ohne dass es eine Gruppe gibt, die diesen ablehnend gegenüber steht. Diese Themen können daher als Konsens

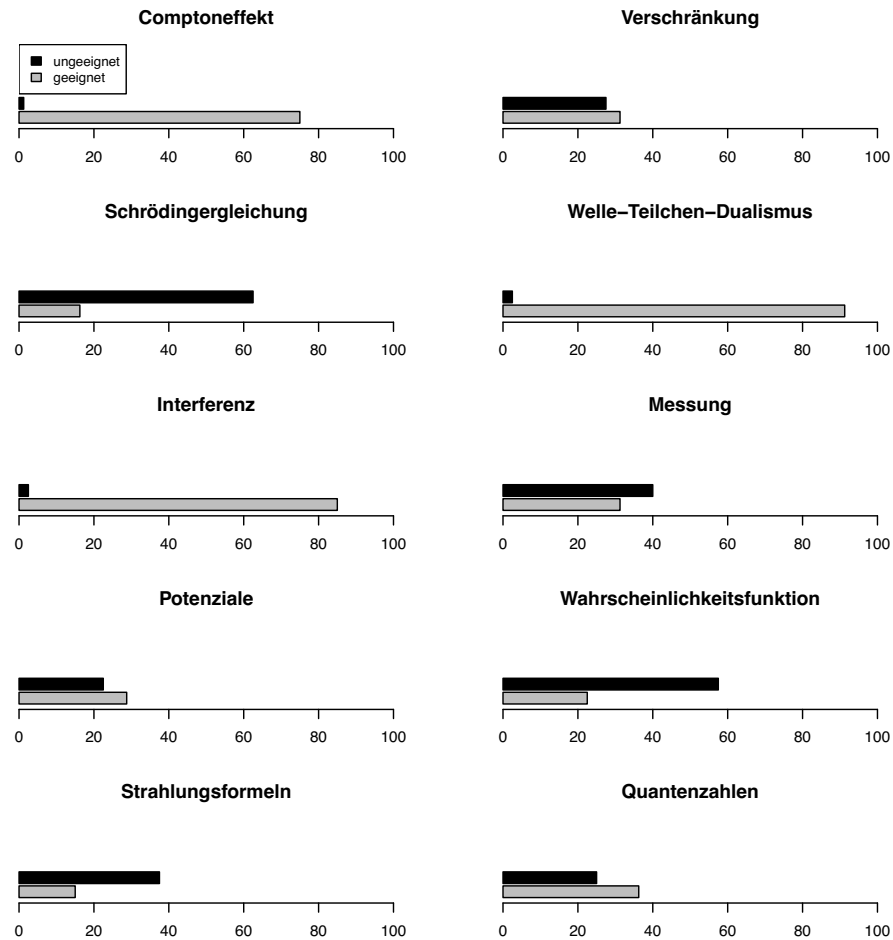


Abbildung 7.10.: Geeignete Schulinhalte 2

der Studentenmeinung gelten. Mit Einschränkung gilt dies auch für die Quantenzahlen und Potenziale, wenn es dabei aber auch eine größere ablehnende Gruppe gibt. Bei den fachlich und interpretatorisch schwierigen Themen wie Drehimpuls, Spin, Quantencomputer, Messung und Verschränkung fällt die Bewertung differenzierter aus, Befürworter und Gegner halten sich dabei ungefähr die Waage. Dies lässt sich so interpretieren, dass eine Behandlung dieser Themen in der Schule aus Studentensicht teilweise möglich erscheint, falls geeignete didaktische Rekonstruktionen gefunden werden können. Fachlich sehr anspruchsvolle Themen, wie Bose-Einstein-Kondensation, Quantenkryptographie, die Schrödingergleichung, Ψ -Funktion und Strahlungsformeln stehen dagegen als ungeeignet zurück.

Diese Ergebnisse und die hohe studentische Zustimmung zu Photo- und Comptoneffekt trotz mäßiger Behandlung in den Vorlesungen, stützt die Aussage von MÜLLER und WIESNER (1997), dass eigene Schulerfahrungen von den Studenten für das eigene Unterrichten rekonstruiert werden. Es zeigt aber auch die Offenheit gegenüber neuen oder schwierigen

Konzepten, wenn diese nur ansprechend eingeführt werden.

Zwei weitere Items beleuchten die Unterrichtskonzeption: 66 % der Befragten sehen die Behandlung der Quantenphysik über ihre Geschichte als ziemlich oder völlig geeignet an. Einem Ansatz über die Philosophie dieses Fachgebietes können 19 % völlig, 25 % ziemlich und immerhin 27 % doch teilweise zustimmen.

Im folgenden Teil der Arbeit, der Evaluation des konzipierten Kurses zur Quantenphysik, wurden die Teilnehmer neben weiteren Testfragen auch zu Definition, Relevanz und Lehrbarkeit der Themen Unbestimmtheit, Dualismus und Verschränkung befragt (Siehe hierzu Seite 178). Die Ergebnisse dort decken sich ebenfalls weitestgehend mit den Aussagen der Studenten in dieser Umfrage.

Welche Inhalte der Quantenphysik könnten aus Studentensicht gemeinsam in der Schule unterrichtet werden? Untersucht man die inhaltlichen Zusammenhänge, so zeigt sich zwischen *Spin und Drehimpuls* eine starke, signifikante Korrelation, die in der sehr ähnlichen mathematischen Struktur und Analogiebeziehungen zu suchen ist. Die signifikanten Korrelationen zwischen den Themen *Verschränkung*, *Messung und Unbestimmtheit jeweils untereinander*, sowie *Compton- und Photoeffekt* und *Kryptographie und Computer* liegen im mittleren bis starken Bereich. Diese Bereiche werden daher für die folgende Clusteranalyse fusioniert. Die Bose-Einstein-Kondensation wurde nur zweimal genannt und wurde aus Gründen der Verallgemeinerung entfernt.

Zur Verbesserung des eigentlichen Complete-Linkage-Verfahrens, wurde zuvor im Single-Verfahren die vier Objekte mit höchster Distanz (ID 2,3,16,19) identifiziert und entfernt. Die Hauptclusteranalyse im Complete-Linkage-Verfahren mit anschließender Validierung der beiden unterschiedlich starken Gruppen mittels t-Tests liefert als beste Anpassung zwei Gruppen: Die Agglomeration der Gruppen von $\alpha = 0.84$ ist als gut zu bezeichnen, die t-Tests liefern allerdings nicht immer eine saubere Trennung der Gruppen, nur die Themen *Unbestimmtheit/Verschränkung/Messung*, *Laser* und *Compton-/Photoeffekt* unterscheiden sich signifikant voneinander.

Die mit 76 Prozent deutlich größere Gruppe umfasst *Anwender*, die im Vergleich zur zweiten Gruppe beispielsweise den Laser, etwas auch die Themen Quantencomputer/-kryptographie und deutlich auch den Compton-/Photoeffekt als geeignete Schulinhalte ansehen.

Die zweite Gruppe der *Konzeptionalisten* lehnt Anwendungen und Beispiele wie Laser, Compton-/Photoeffekt eher ab und fokussiert sich auf Konzepte wie Interferenz und Quantenzahlen.

Tabelle 7.9.: Korrelation der geeigneten Schulinhalte untereinander, signifikante mittlere und starke Korrelationen sind fett gedruckt (siehe RASCH et al., 2010, S.133)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1 Unbestimmtheit																
2 Drehimpuls	0.01															
3 Spin	0.22	0.56***														
4 Laser	0.31**	0.03	0.11													
5 Quantencomputer	0.29**	-0.07	-0.02	0.20												
6 Quantenkryptographie	0.11	-0.03	0.04	0.13	0.32**											
7 Photoeffekt	0.01	0.01	0.21	0.25*	0.03	0.16										
8 Comptoneffekt	0.09	-0.02	0.13	0.27*	0.21	0.19	0.43***									
9 Verschränkung	0.41***	0.13	0.05	0.17	0.27*	0.40***	0.24*	0.26*								
10 Schrödingergleichung	0.02	0.07	-0.10	0.02	0.05	-0.11	-0.06	0.02	0.07							
11 Welle-Teilchen-Dualismus	-0.03	-0.24*	0.08	-0.14	-0.02	0.03	0.03	0.13	-0.08	-0.34**						
12 Interferenz	0.01	0.07	0.08	-0.19	0.01	0.01	0.07	0.24*	-0.02	0.00	0.24*					
13 Messung	0.30**	0.00	0.17	0.03	0.15	0.26*	0.24*	0.26*	0.36**	0.07	0.11	0.13				
14 Potentiale	0.09	0.10	0.02	0.07	0.06	0.07	0.14	-0.02	0.17	0.24*	-0.19	0.11	0.29**			
15 Wellenfunktion	0.31**	0.19	0.10	0.09	0.02	-0.17	0.00	0.17	0.28*	0.09	-0.05	0.06	0.22	0.19		
16 Strahlungsformeln	-0.01	0.34**	0.24*	0.01	0.07	-0.10	-0.07	-0.08	0.09	0.00	0.01	-0.02	0.02	0.04	-0.06	
17 Quantenzahlen	-0.09	0.19	0.29*	-0.06	-0.10	-0.01	0.19	0.08	0.00	-0.05	0.14	0.17	-0.12	0.15	0.09	0.19

. p<0.1 * p<0.05 ** p<0.01 *** p<0.001

Tabelle 7.10.: Die zwei Gruppen der Clusteranalyse zu geeigneten Schulinhalten

	Gesamtmittelwerte	Mittelwerte 1	Mittelwerte 2
Unbestimmtheit/Verschränkung/Messung	0.71	0.81	0.39
Spin/Drehimpuls	0.33	0.34	0.28
Laser	0.82	1.00	0.22
Quantencomputer/-kryptographie	0.34	0.40	0.17
Compton-/Photoeffekt	0.91	0.97	0.72
Schrödingergleichung	0.17	0.17	0.17
Welle-Teilchen-Dualismus	0.91	0.88	1.00
Interferenz	0.86	0.81	1.00
Potentiale	0.29	0.33	0.17
Wellenfunktion	0.24	0.28	0.11
Strahlung	0.14	0.12	0.22
Quantenzahlen	0.37	0.33	0.50

Tabelle 7.11.: Vergleich der Gruppen mit Gruppengröße hinsichtlich geeigneter Schulinhalte

Vorlesungsinhalte	Gruppe 1(76%)	Gruppe 2 (24%)	t-Test
Unbestimmtheit/Verschränkung/Messung	↑	↓	***
Spin/Drehimpuls	→	→	-
Laser	↑	↓	***
Quantencomputer/Quantenkryptographie	→	↓	·
Compton-/Photoeffekt	→	↓	**
Schrödinger	→	→	-
Welle-Teilchen-Dualismus	→	→	-
Interferenz	→	↑	*
Potentiale	→	↓	-
Wellenfunktion	→	↓	-
Strahlung	→	→	-
Quantenzahlen	→	↑	-

↓ geringe Ausprägung

→ durchschnittliche Ausprägung

↑ hohe Ausprägung · $p < 0.1$ * $p < 0.05$ ** $p < 0.01$ *** $p < 0.001$

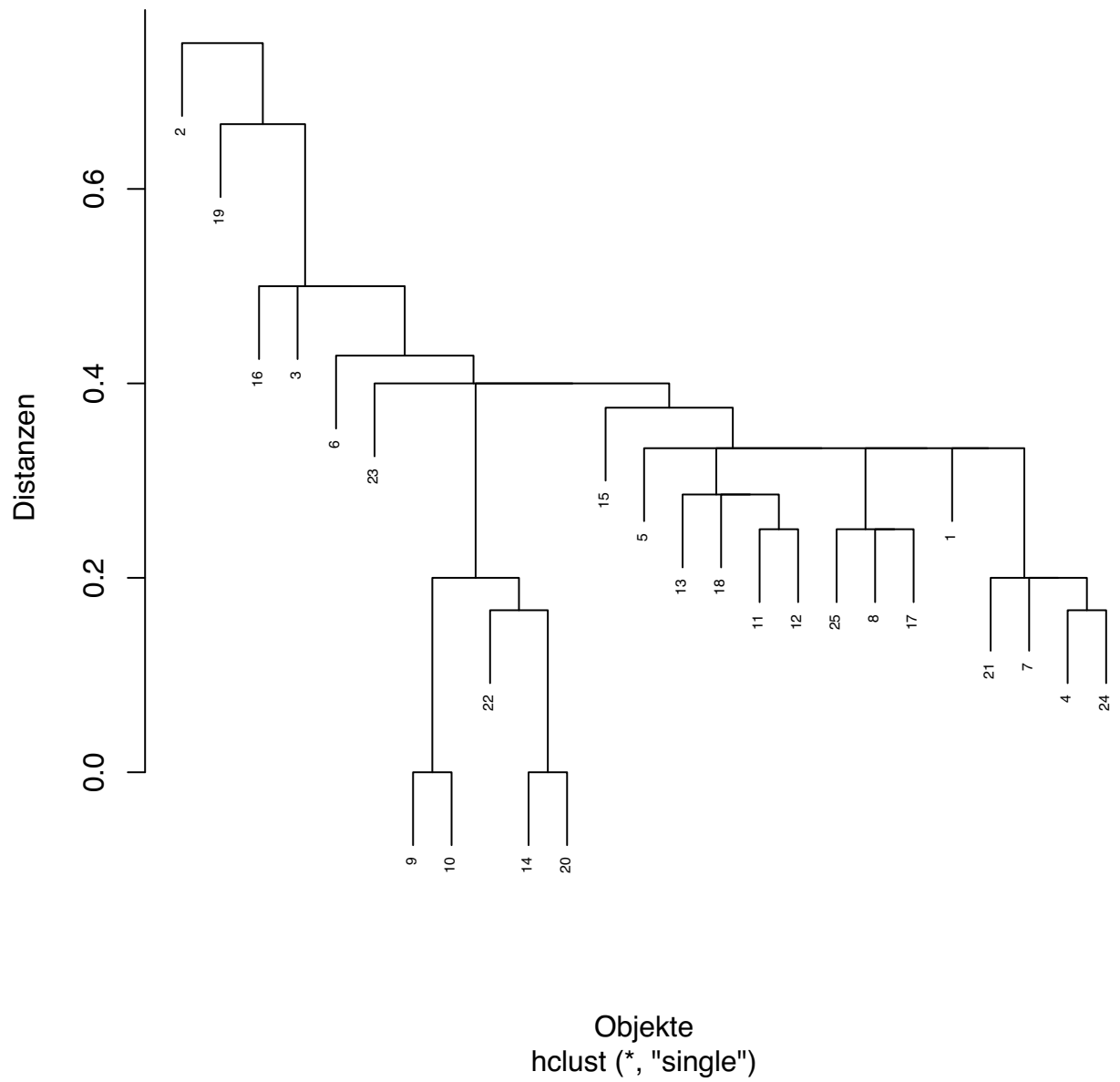


Abbildung 7.11.: Geeignete Schulinhalte - Dendrogramm der Clusteranalyse im Single-Linkage-Verfahren

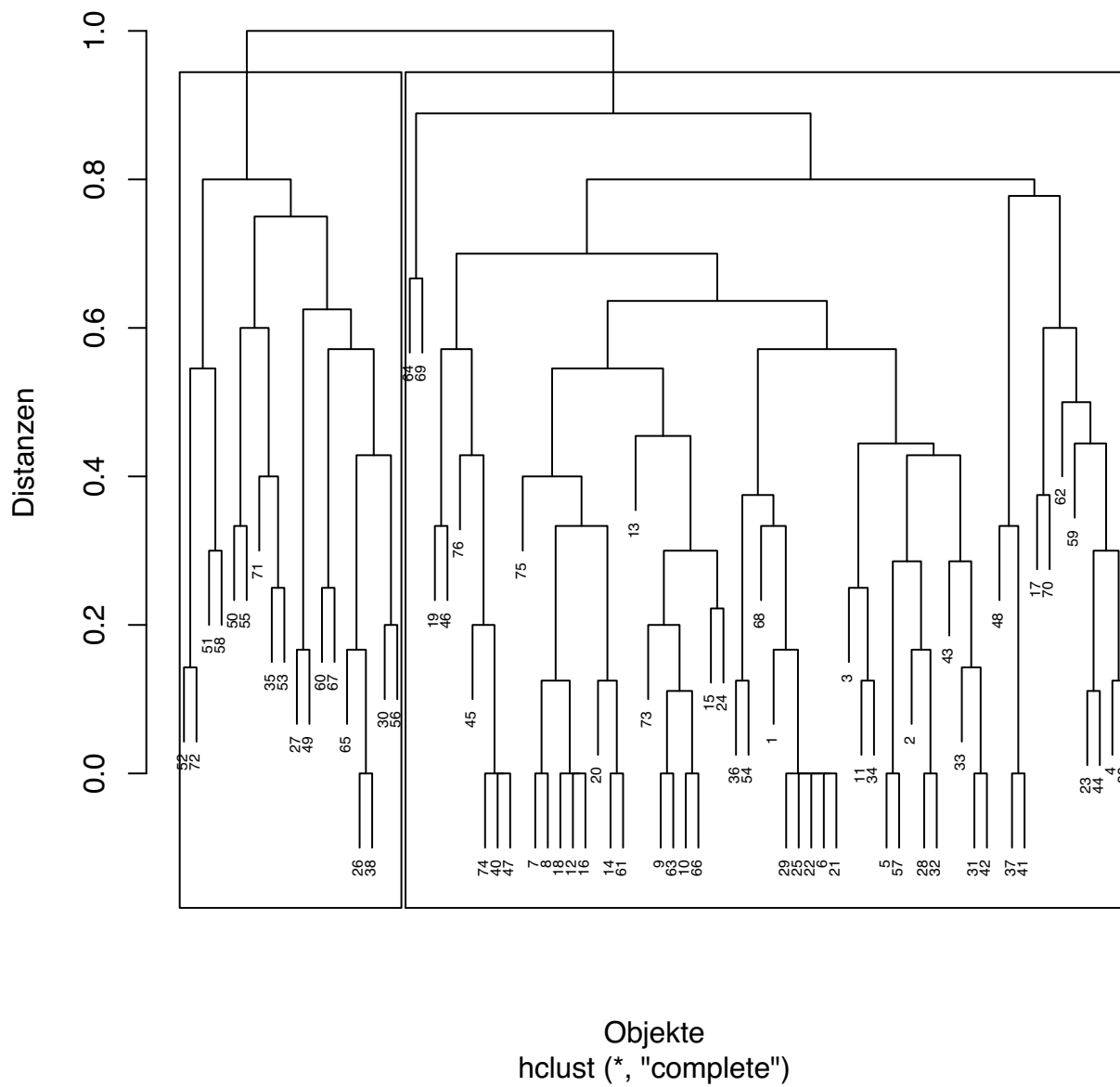


Abbildung 7.12.: Geeignete Schulinhalte - Dendrogramm der Clusteranalyse im Complete-Linkage-Verfahren mit Gruppenzuordnung

7.2. Anforderungsanalyse Dozenten

7.2.1. Themen und Ziele der Vorlesungen

Die Dozenten der Theoretischen Physik wurden ebenfalls wie die Studenten nach den behandelten Themen befragt. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.13 dargestellt. Konzepte und Anwendungen/Beispiele nehmen bei den Themen, wie auch schon bei den Studenten beobachtet, einen breiten Raum ein. Der Formalismus spielt aus Dozentensicht eine untergeordnetere Rolle. Dies ist insofern verwunderlich, da er bei den Studenten sehr prominent ist. Möglicherweise wird er aber von den Dozenten im Gegensatz zu Konzepten und Anwendungen gar nicht mehr als eigenständig wahrgenommen, sondern implizit vorausgesetzt. Philosophische und geschichtliche Themen und der Ausblick in weiterführende Gebiete, wie die Quantenfeldtheorie, spielen eine untergeordnete Rolle. Es fällt bei der Auswertung auf,

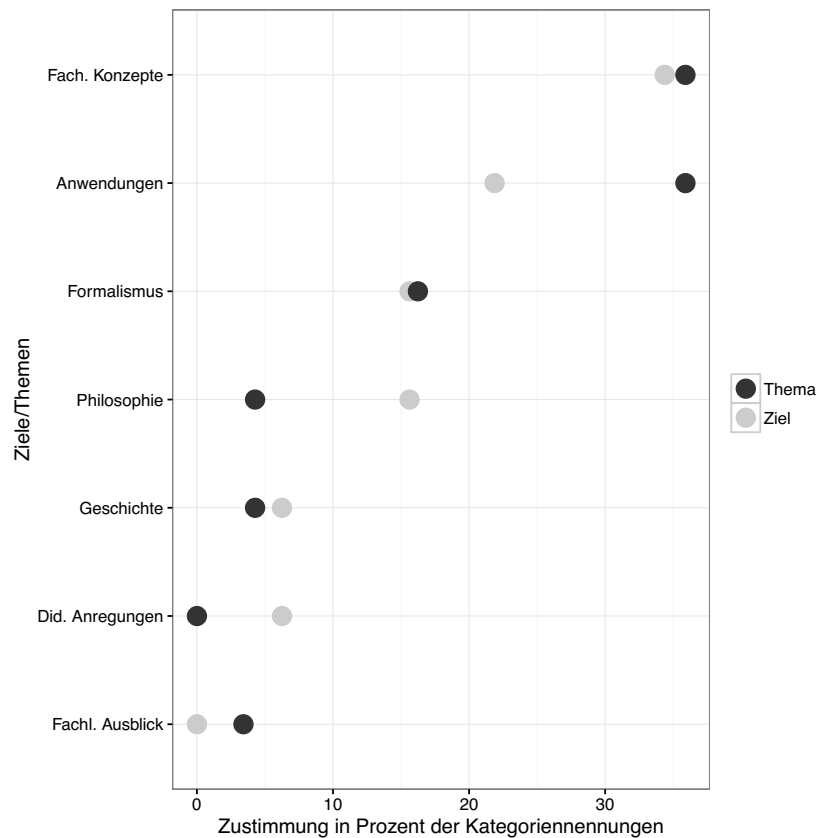


Abbildung 7.13.: Erwünschte Ziele und tatsächlich behandelte Themen der Dozenten

dass Konzepte und Anwendungen häufig sowohl als Ziele als auch tatsächlich behandelte Themen genannt werden, die Anwendungen werden dabei noch häufiger behandelt als ursprünglich geplant. Der Vermittlung des Formalismus kommt häufig eine stärkere Geltung,

der Philosophie aber eine geringere Bedeutung als Vorlesungsthemen zu als sie ursprünglich als Lehrziele formuliert wurden. Ziele der Dozenten, die unterrichtsmethodische Themen betrafen, wurden bei den behandelten Gebieten nicht genannt.

Tabelle 7.12.: Kontingenz von Zielen bei der qualitativen Analyse der Dozentenantworten, x kennzeichnet das mindestens einmalige Vorkommen dieser Kategorie

Konzepte	Formalismus	Anwendungen	Häufigkeit %
x	x	x	30
			25
x		x	20
x	x		15
x			5
		x	5

Tabelle 7.13.: Kontingenz von Themen bei der qualitativen Analyse der Dozentenantworten

Konzepte	Formalismus	Geschichte	Anwendung	Philosophie	Häufigkeit %
x	x		x		40
x			x		15
x		x	x		10
x	x		x	x	10
			x		5
x			x	x	5
	x	x	x	x	5
x	x	x	x	x	5
		kein Vorkommen			5

Untersucht man das Zusammenauftreten (Kontingenz, Tab. 7.12 & 7.13) der qualitativen Kategorien zu den Themen und Zielen der Lehrveranstaltung, so zeigt sich, dass mit 40 Prozent die Kombination von *Konzepte*, *Formalismus* und *Anwendungen* als Themen der Lehrveranstaltung am häufigsten gleichzeitig von den Befragten genannt wird. Die Kombination ohne explizite Behandlung des Formalismus tritt als nächst häufigere Kategorie auf. Jeder zehnte Dozent kombiniert den erstgenannten Typus noch zusätzlich mit philosophischen Themen. Die Kombination der Kategorien bei den Zielen ist deutlich weniger vielfältig, aber auch hier kann die Kombination der Konzepte, des Formalismus und Anwendungen als gemeinsamer Konsens gelten. Diese Kombination ohne den Formalismus stellt bei den Zielen ebenfalls eine häufige Wahl der Dozenten dar. Die Wahl der Ziele ist aber deutlich spezieller, da viele Dozenten ihre Ziele isoliert voneinander wählen. So ist das jeweils isolierte Auftreten der Ziele *Konzepte*, *Formalismus* und *Anwendungen* mit 25 % zweithäufigste Kategorie.

Welche Hindernisse können der Erreichung dieser Ziele aus Dozentensicht entgegenstehen? Wie die Übersicht 7.14 zeigt, werden vor allem die für die Vorlesung zur Verfügung stehende

Zeit und die mathematischen Vorkenntnisse und Fähigkeiten der Lehramtsstudenten als kritische Punkte angesehen. Unpassende Lehrmedien, fehlende Motivation bzw. Intellekt der Studenten spielen als Hindernisse eher eine untergeordnete Rolle. Pauschal werden studentische Vorkenntnisse aber nicht als schlecht beurteilt. Die allgemeinen Vorkenntnisse wurden in einem zusätzlichen Frageitem von der einen Hälfte der Dozenten als ausreichend, von der anderen als unzureichend klassifiziert. Der zweitgrößte Problem, der Zeitdruck, ergibt sich für den Großteil der Dozenten nicht daraus, dass mehr Themen als notwendig unterrichtet werden, da der Umfang der Lehramtsausbildung in diesem Bereich von 60 % als ausreichend, aber nicht als zu umfangreich, eingestuft wird. Beide Probleme ergeben sich möglicherweise aus der Zweitfachwahl und der Vielzahl der thematischen Verpflichtungen im Lehramtsstudium.

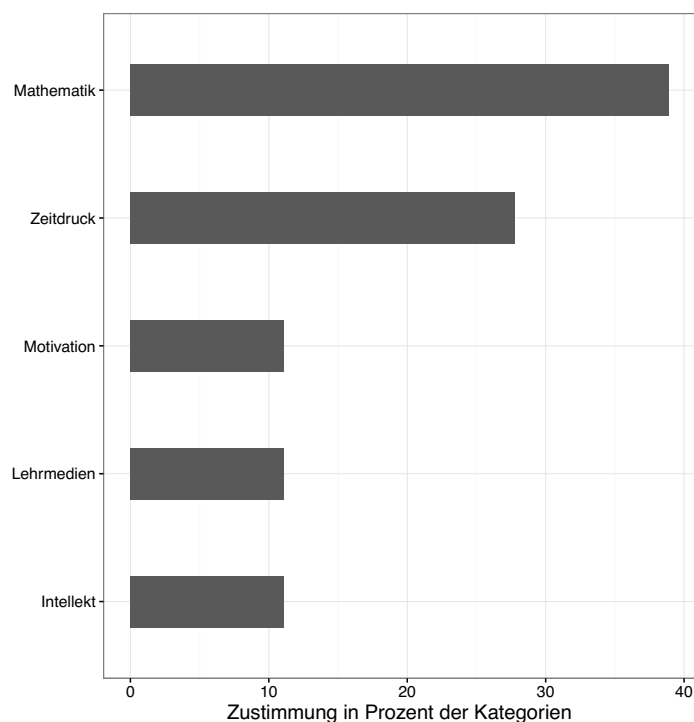


Abbildung 7.14.: Hindernisse aus Dozentensicht

7.2.2. Angestrebte Kompetenzen aus Dozentensicht

Die von den Dozenten angestrebten inhaltlichen Kompetenzen sind weitestgehend konsistent mit den kategorisierten Zielen der Vorlesungen. Auch hier führen die Erklärung wesentlicher quantenphysikalischer Konzepte und die Nennung wichtiger Beispiele und Anwendungen mit 29 bzw. 27 Prozent aller Kategorienennungen. Hinzu kommt als Erweiterung die Kompetenz „neue Beispiele mit Hilfe wesentlicher Prinzipien und Konzepte erläutern zu können“, die als höher als die reine Kenntnis quantenphysikalischer Konzepte einzuschätzen ist. Sie wird allerdings mit 13 Prozent nur etwa halb so häufig von den Dozenten erwähnt. Formale Rechnungen bzw. das abstraktere Pendant der mathematischen Analyse quantenphysikalischer Fragestellungen werden nicht allzu häufig genannt. Ein möglicher Grund ist, dass diese implizit als notwendig für die Durchdringung von Konzepten erachtet werden.

Auffällig ist, dass von den Dozenten hauptsächlich konzeptionelle Ziele, das Kennen von Beispielen und Anwendungen und teilweise die Beherrschung des Formalismus als Kompetenzen angestrebt werden. Jede zehnte von den Dozenten angesprochene Kategorie bezieht sich auf die Kenntnis methodisch-didaktischer Konzeptionen. Diese kommt jedoch als Ziel kaum und als tatsächlich behandeltes Thema gar nicht zum Vorschein. Dies könnte erklären, warum sich die Studenten zwar fachlich gut, fachdidaktisch, vor allem hinsichtlich unterrichtspraktischer Kompetenzen, so schlecht vorbereitet fühlen.

Für die Betrachtung der Zusammenhänge zwischen den angestrebten Kompetenzen wurden alle die Fälle entfernt, die keine der vorgegebenen Kompetenzen anstreben und keine Alternativvorschläge gemacht haben. Die Kompetenz *Erklärung von Konzepten* besitzt keine Varianz, da sie von allen Dozenten intendiert wird. Für sie lassen sich keine Korrelationen berechnen. Die restlichen angestrebten Kompetenzen zeigen nur einen geringen Zusammenhang, Tab.7.14 untereinander, so dass sie sich grundsätzlich für eine Clusteranalyse eignen.

Tabelle 7.14.: Korrelation der angestrebten Kompetenzen untereinander

	1	2	3	4
1. Math.Analyse				
2. Did. Methoden	-0.16			
3. Nennung Bsp.	0.22	0.17		
4. Erläut. neue Bsp.	-0.13	0.08	0.22	
5. Form. Rechnungen	0.55*	-0.25	0.17	0.08

Nur die beiden Kompetenzen *mathematische Analysen quantenphysikalischer Fragestellungen geben* und *formale Rechnungen durchführen zu können*, sind signifikant korreliert, da sie zwar auf einem unterschiedlichen Anforderungsniveau liegen, aber eng miteinander verwandt sind. Daher wurden für die Clusterung diese beide Kategorien zusammengefasst.

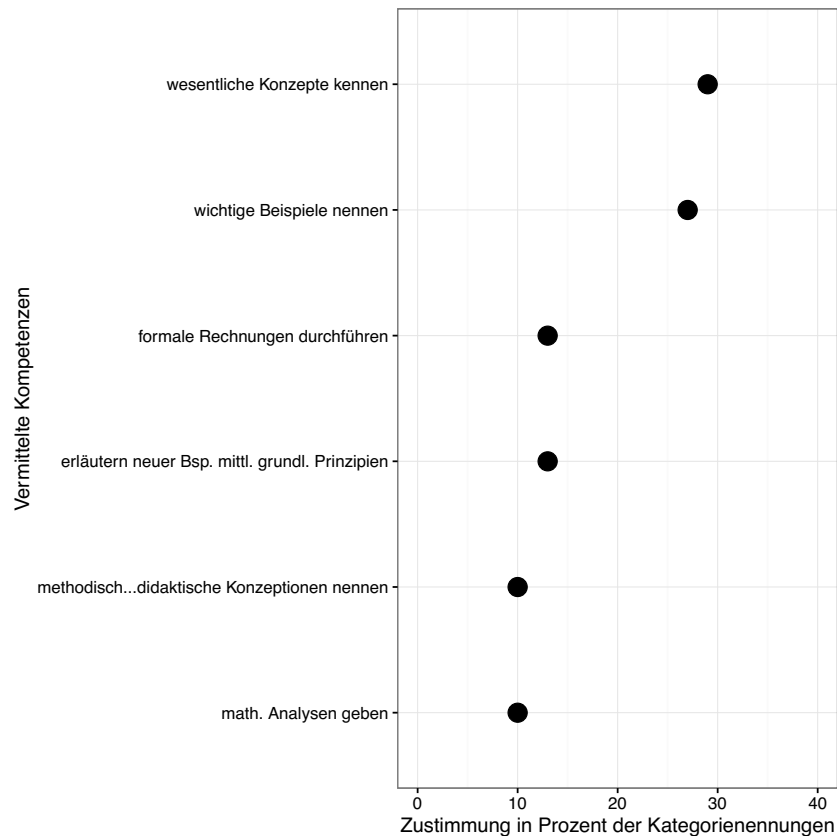


Abbildung 7.15.: Vermittelte Kompetenzen aus Dozentensicht

Für die bessere Clusterung im eigentlichen Verfahren wurde das Objekt 1 als Ausreißer mit zu hoher Distanz zu den anderen Objekten im Dendrogramm in Abbildung 7.16 entfernt. Für die genauere Untersuchung verschiedener Untergruppen wurde dann eine Clusteranalyse im Complete-Linkage-Verfahren berechnet, dessen Ergebnis im Dendrogramm Abb.7.17, sowie in den Tabellen 7.15 bis 7.17 zu sehen ist.

Tabelle 7.15.: Die drei Gruppen der Clusteranalyse zu angestrebten Kompetenzen

	Gesamtmittelwerte	Mittelwerte 1	Mittelwerte 2	Mittelwerte 3
Math.Analyse/Formales	0.47	0.33	0.00	1.00
Did. Methoden	0.35	0.50	0.60	0.00
Erkl. Konzepte	1.00	1.00	1.00	1.00
Nennung Bsp.	1.00	1.00	1.00	1.00
Erläut. neue Bsp.	0.47	0.00	1.00	0.50

Dabei zeigte sich eine Lösung mit drei ungefähr gleich großen Gruppen mit einem sehr guten Agglomerationskoeffizienten von $\alpha = 0.98$ als statistisch günstig. Die Trennung der Gruppen konnte durch Varianzanalyse mit anschließendem multiplen Paarvergleich bestätigt werden⁴.

⁴ Analyse im Anhang Abschnitt 19 auf Seite 229

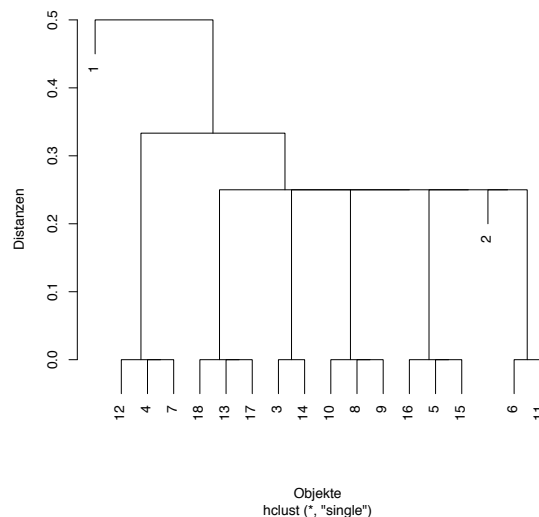


Abbildung 7.16.: Kompetenzen - Dendrogramm der Clusteranalyse im Single-Linkage-Verfahren zur Identifizierung von Ausreißern

Tabelle 7.16.: Vergleich der Gruppen hinsichtlich der Kompetenzen

Kompetenz	Gruppe 1(35%)	Gruppe 2 (29%)	Gruppe 3(35%)
formal-analytisch	↓	↓	↑
didaktische Methoden	↑	↑	↓
qp. Konzepte	→	→	→
qp. Bsp. & Anw.	→	→	→
Neue Beispiele aus qp. Prinzipien	↓	↑	→
↓ geringe Ausprägung → durchschnittliche Ausprägung ↑ hohe Ausprägung			

Es kann zwischen zwei Typen von Dozenten unterschieden werden: Zum einen diejenigen, die signifikant mehr Wert auf formale Berechnungen und mathematische Analysen, aber wenig auf didaktische Methoden legen (Gruppe 3 in Tab. 7.16), sowie Dozenten, die eher methodisch-didaktische Konzeptionen als vermittelte Kompetenzen anstreben (Gruppe 1 und 2). Letztere teilt sich wiederum in zwei Untergruppen, wobei die Dozenten der zweiten Gruppe neue Beispiele mittels quantenphysikalischer Prinzipien analysieren zu können als hohe Kompetenz anstreben, die der ersten hingegen nicht. Die dritte Gruppe liegt bei dieser Kompetenz im Durchschnitt. Das Kennen quantenphysikalischer Konzepte und wichtiger Beispiele und Anwendungen wird von allen drei Gruppen als gleich als sehr wichtig angesehen.

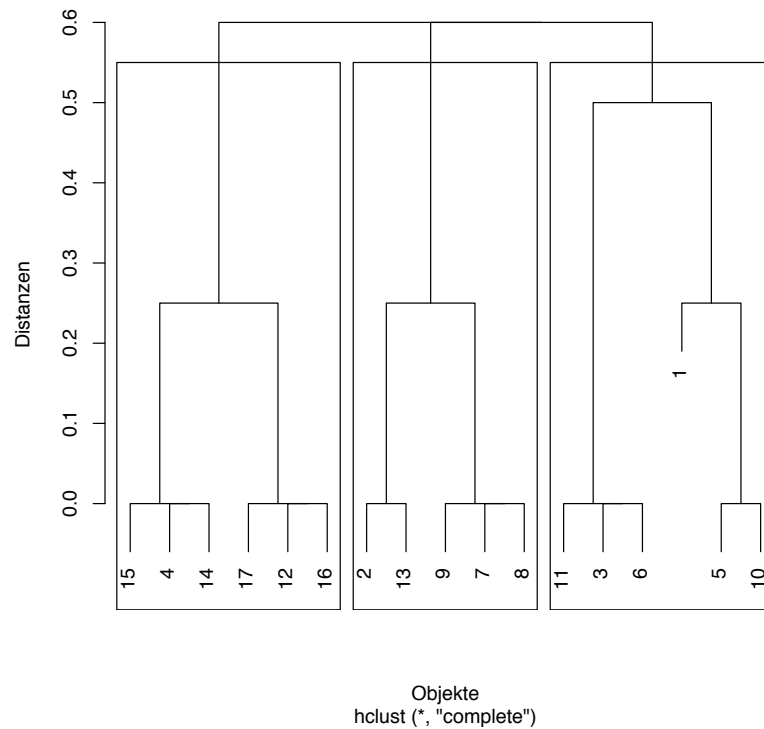


Abbildung 7.17.: Kompetenzen - Dendrogramm der Haupt-Clusteranalyse im Complete-Linkage-Verfahren mit Gruppenzuordnung in den drei grauen Kästen

Tabelle 7.17.: Unterschiede in den Gruppen hinsichtlich der Kompetenzen

Kompetenz	ANOVA	Post-Hoc-Test
formal-analytisch	***	1-3**, 2-3***
didaktische Methoden	.	
qp. Konzepte	-	
qp. Bsp. & Anw.	-	
Neue Beispiele aus qp. Prinzipien	**	1-2**

· p<0.1 * p<0.05 ** p<0.01 *** p<0.001

7.2.3. Wichtige Konzepte der Quantenphysik

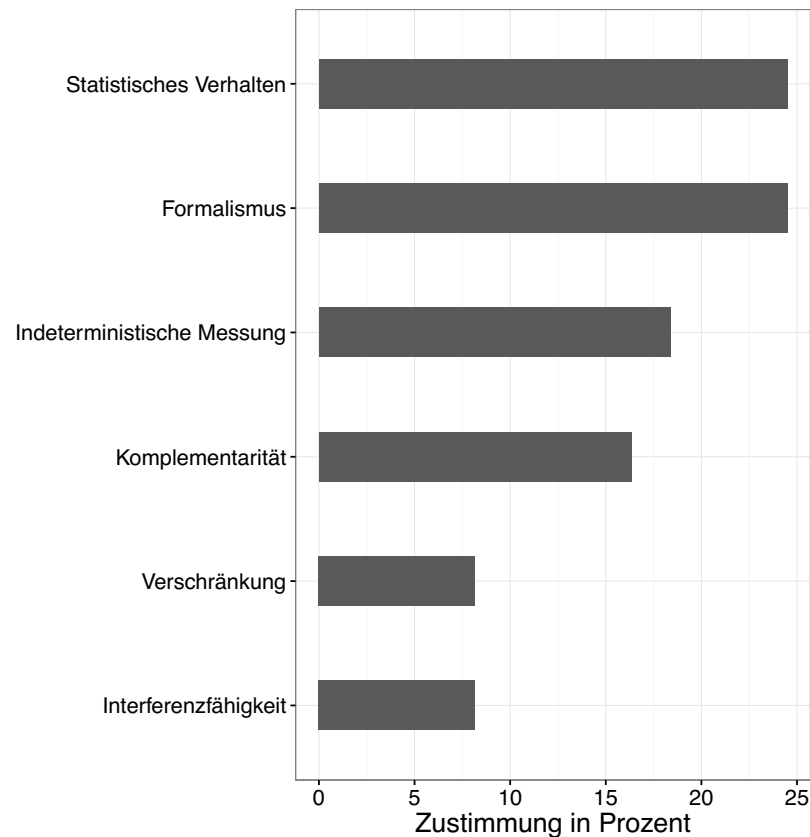


Abbildung 7.18.: Die wichtigsten quantenphysikalischen Konzepte aus Dozentsicht

Das Kennen von Konzepten wird von den Dozenten als die wichtigste Kompetenz angesehen. Bei der Befragung der Dozenten nach den wesentlichen Konzepten der Quantenphysik wird bemerkenswerterweise mit an erster Stelle der Formalismus selbst genannt. Dies ist insofern erklärbar, dass viele quantenphysikalische Phänomene der natürlichen Intuition zuwider laufen und nur im Zusammenspiel von überraschenden experimentellen Ergebnissen und dem Kalkül begründet werden können. Diese starke Betonung des Formalismus deckt sich weitestgehend mit den Antworten der zu vermittelnden Kompetenzen und den verfolgten Zielen und Themen der Dozenten, bei denen sich der Formalismus jeweils auf dem dritten Platz befindet.

Als konkretes Konzept hat das statistische Verhalten von Quantenobjekten einen gleich hohen Stellenwert. Im Hinblick auf geeignete Schulinhalte entspricht es am ehesten der Wahrscheinlichkeitsfunktion, wobei dieser Begriff enger auf den Formalismus konzentriert zu verstehen ist. Die Wahrscheinlichkeitsfunktion wird von den Studenten ambivalent betrachtet, so dass dieses als wichtig erachtete Konzept den Studenten konkret erläutert werden muss. Ähnliches zeigt sich bei der indeterministischen Messung, welche am

dritthäufigsten genannt wird, aber von der Hälfte der Studenten als Schulthema ungeeignet angesehen wird. Auch hier könnte der Grund darin liegen, dass für den abstrakten Messprozess noch keine geeigneten Visualisierungen und Analogien wie bei den typischen Experimenten/Anwendungen und Grundkonzepten wie Unbestimmtheit und Interferenz vorliegen. Die bei den Studenten als Schulinhalt bevorzugte Unbestimmtheit wird in der allgemeineren Kategorie der Komplementarität von den Dozenten als wichtig anerkannt. Dass Verschränkung und Interferenzfähigkeit als Kategorien etwas hinter den anderen zurückstehen, überrascht etwas, möglicherweise wird die Verschränkung von einigen nicht als Grundkonzept angesehen oder beide Kategorien werden bereits unter dem komplementären Verhalten subsumiert. Der von den Studenten häufig als schulgeeignetes Konzept genannte Welle-Teilchen-Dualismus tritt bei der Dozentenbefragung nicht auf. Abschließend wird dargestellt, inwieweit die einzelnen von den Dozenten eingeordneten Grundkonzepte den Studenten in der Ausbildung deutlich werden. Der Median der studentischen Einstufung ist im Allgemeinen „stimmt teils-teils“ mit Tendenz zur nächsthöheren Kategorie „stimmt ziemlich“. Dabei zeigt Abbildung 7.19, dass vor allem das von den Dozenten als sehr wichtig erachtete statistische Verhalten von den Studenten klar aus den Vorlesungen hervorgehend betrachtet wird. Interferenz, Verschränkung und Komplementarität befinden sich mit ihrem Median ebenfalls auf der zweithöchsten Stufe mit leichter Tendenz zur Mitte. Nur der Messprozess mit dem Kollaps der Wellenfunktion wird leicht schlechter eingeschätzt und könnte als Thema im Seminar aufgegriffen werden. Insgesamt schätzen die Studenten die Deutlichkeit der Grundkonzepte als hoch ein.

Eine Festlegung von Grundkonzepten gestaltet sich aber als überaus schwierig. Das zeigt auch eine ähnlich gelagerte Studie von MCKAGAN et al. (2010): Von ihm wurden acht Fakultätsmitglieder befragt, drei wesentliche Konzepte moderner Physik – im speziellen der Quantenphysik – zu nennen. Dies diente der Konsensbildung für die Formulierung von Lernzielen und der Entwicklung eines Evaluationsfragebogens. Allerdings konnte schon bei dieser kleinen Gruppe kein Konsens erreicht werden, teilweise wurden das Kennen von Konzepten als Lernziel abgelehnt und stattdessen Rechenfähigkeiten oder Kenntnisse über Geschichte und Anwendungen als Ersatz genannt. Folgende Konzepte wurden genannt, zeigten aber nur eine geringe Überlappung:

- Wellenfunktion und Wahrscheinlichkeiten 63 %
- Wellen-Teilchen-Dualismus 50 %
- Schrödinger-Gleichung 50 %
- Zustandsquantisierung 50 %
- Unbestimmtheit 38 %
- Superposition 38 %
- Operatoren und Observable 38 %

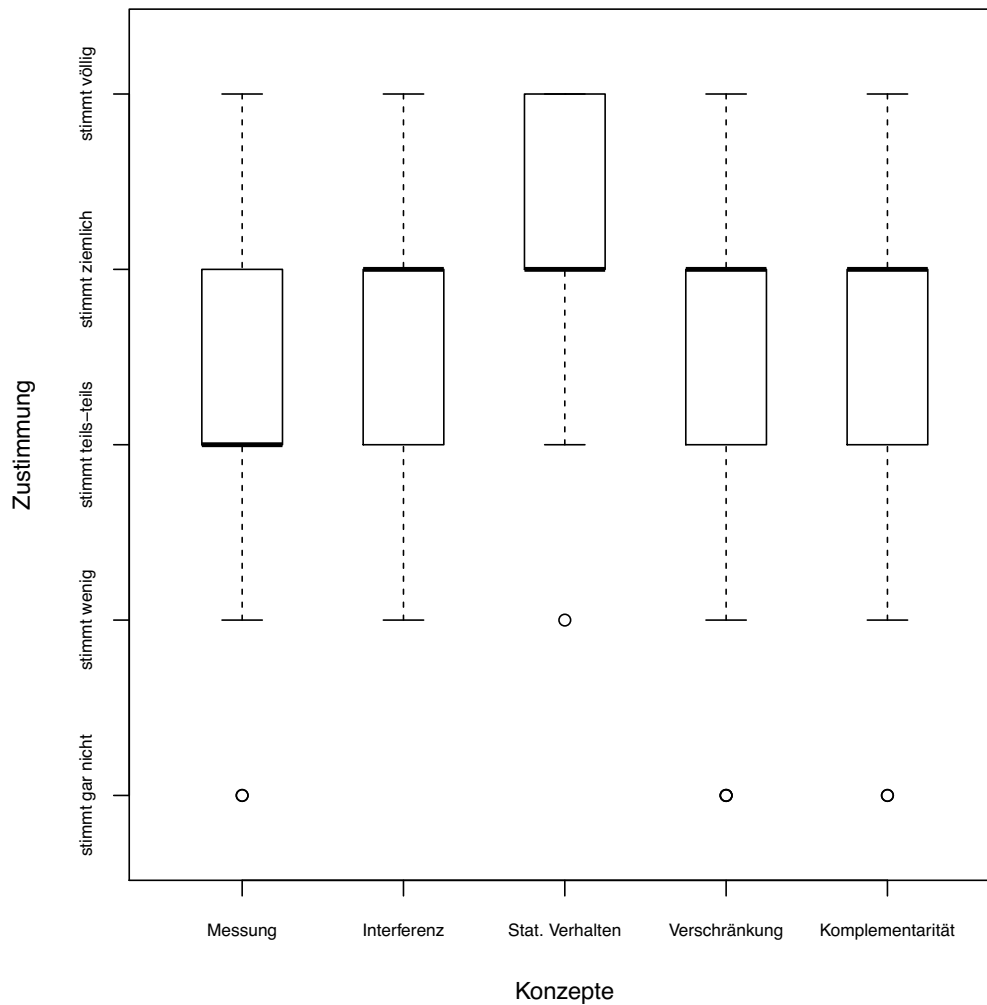


Abbildung 7.19.: Deutlichkeit der Grundkonzepte aus Studentensicht

- Quantenmechanisches Tunneln 25 %
- Messung 25 %

Laut den Autoren wurde das Thema Messung sehr kontrovers diskutiert, teilweise wird dieses auf Grund der Verbindung der Theorie mit der Realität als sehr wichtig eingeschätzt, teilweise als unwichtig angesehen. Im Gegensatz zu MCKAGAN et al. (2010) wird es als wichtiges Konzept in der vorliegenden Arbeit beibehalten.

8. Zusammenfassung und Diskussion

Es zeigt sich, dass in den Vorlesungen und Übungen im wesentlichen der Formalismus der Quantenmechanik, die Schrödingergleichung und benachbarte Themen – Potenziale als deren Anwendungen und historische Versuche – behandelt werden. Vorlesende intendieren eine Darstellung der Grundkonzepte mit physikalischen und mathematischen Modellen, dazu die wichtigsten Anwendungen und historische Experimente. Die Modelle und Experimente werden so auch von den Studenten wahrgenommen, gewünscht wird aber ein stärkeres Eingehen auf die physikalische Modellbildung mit Erläuterung der Grundideen und Interpretationsfragen, stärkerer Anwendungsbezug und Klärung weitergehender fachdidaktischer Fragestellungen wie Schülervorstellungen und unterrichtspraktische Methoden, welche zwar teilweise von den Dozenten als Ziele genannt, aber nicht umgesetzt werden. In weiteren Fragen kommt zum Ausdruck, dass die Lehramtsstudenten sich fachlich recht gut, in fachdidaktischen Fragestellungen mit 80 % aber nicht oder zu wenig auf den Schuldienst vorbereitet fühlen. Dies betrifft insbesondere auch das schulrelevante fachliche Wissen, deren besondere Bedeutung in der Literatur, beispielsweise bei RIESE (2009) deutlich wird. Unterrichtspraktische Kompetenz wird faktisch nicht in den Vorlesungen vermittelt. Die Ergebnisse sind mit einer methodisch ähnlich gelagerten Analyse der Anforderungen, die speziell das Verhältnis von Theorie und Praxis aus psychologischer Sicht beleuchtet (KREUTZMANN, 2003) vergleichbar. Für diese wurden Lehramtsstudenten mit verschiedenen Fächerkombinationen der Universität Leipzig in qualitativen Interviews befragt. Die Praxisanteile im Studium, wie schulpraktische Übungen oder Blockpraktika, wurden gegenüber der Theorie von Studenten stark bevorzugt. Die Nützlichkeit von theoriebestimmten Ausbildungsphasen wurde oft im Hinblick auf Transferierbarkeit in die Praxis betrachtet. Allerdings geben die Autoren zu bedenken, dass relevante Bereiche der Theorie oft von den Studenten nicht abschätzbar waren und eine Thematisierung des Lehrerberufs und Aufbrechen der Schülerperspektive wünschenswert wäre. Ein Herausarbeiten des fachlichen Kerns und eine Vorbereitung auf Vermittlung dieses Kerns in der Schule sind durchaus als Ziele anzustreben, wodurch die Lücke zwischen den fachlichen und schulischen Belangen verkleinert werden könnte.

Für ein zusätzlich fachdidaktisch orientiertes Seminar zum Thema Quantenphysik ist der Formalismus nur für jeden vierten Lehramtsstudenten relevant und wird sonst eher abgelehnt. Dies kann so interpretiert werden, dass Konzepte in formaler Hinsicht von den Studenten als bekannt angesehen werden, es aber trotzdem ein Bedarf an Interpretation

und konkreten Anwendungsbeispielen, aber vor allem am Erkennen von themenbezogenen Schülervorstellungen und an der Anleitung zur unterrichtspraktischen Umsetzung gibt. Dies ist umso wichtiger, da eine große Gruppe an Dozenten sehr an der Vermittlung des Formalismus und wenig an den Anwendungen orientiert ist. Die Studenten haben aber nicht nur die Unterrichtspraxis im Fokus, sondern sind, wie die Clusteranalyse zeigt, zum einen verständnisorientiert, zum anderen zusätzlich an prägnanten Beispielen und Anwendungen interessiert. Die Kompetenz, neue Beispiele mittels grundlegender quantenphysikalischer Prinzipien erläutern zu können, ist aus Dozentsicht wenig erwünscht, d. h. nur bei ca. einem Drittel der Vorlesungen ausgeprägt und sollte als wichtige Übung auch im fachdidaktischen Seminar seinen Platz finden.

Die mathematisch und physikalisch anspruchsvollen Themen wie Spin und Drehimpuls sind für die Studenten eher nicht schulrelevant, der Welle-Teilchen-Dualismus ist aus Dozentsicht kein wesentliches oder ein ungünstiges Konzept. Diese Themen werden daher kein Inhalt im zu planenden Seminar sein. Da eine Festlegung von Grundkonzepten allerdings schwierig ist, zeigt eine ähnlich gelagerte Studie von MCKAGAN et al. (2010). Auch DUBSON et al. (2009) berichtet über Uneinigkeit von Fakultätsmitgliedern als auch verschiedener Hochschullehrbücher über die Lehrstrategien zur Quantenphysik: Die betraf sowohl die Notwendigkeit diese axiomatisch über Postulate einzuführen, die Behandlung des Messprozesses, insbesondere den Kollaps der Wellenfunktion und ob diese als Träger von Informationen, als Materiewelle oder anders zu verstehen ist. Dies ragt auch stark in die verschiedenen Interpretationsmöglichkeiten und damit in die Philosophie der Quantenmechanik hinein. LIN und SINGH (2016) konnten zeigen, dass die Einordnung von Problemen zu quantenphysikalischen Prinzipien auch Dozenten deutlich schwieriger fällt als das in der klassischen Physik der Fall ist. Bei klassischen Problemen zeigt sich ein viel höherer Konsens unter den Lehrenden und eine deutlichere Abgrenzung richtiger und falscher Zuordnungen.

Die in dieser Arbeit befragten Studenten zeigten sich an philosophischen und geschichtlichen Aspekten der Quantenphysik interessiert. Sie treten allerdings selten mit den Hauptthemen der Dozenten wie Konzepten, Formalismus und Anwendungen auf oder fallen als ursprüngliche Ziele der Zeitnot zum Opfer. Umso mehr sind sie für das Seminar, welches die Vorlesung ergänzt, interessant. Die von den Dozenten genannten Hindernisse der mathematischen Grundkenntnisse und der Zeitnot ergeben sich u.a. aus der Zweifachwahl und der Vielzahl der thematischen Verpflichtungen im Lehramtsstudium.

Die Unterschiede zwischen Dozenten und Studenten zeigen eine gewisse Ähnlichkeit mit den Ergebnissen von REINHOLD (2004, S.128): „Während Studierende, Referendare und Lehrer auf Praxisnähe und unmittelbare Umsetzbarkeit der Wissensbestände im Unterricht drängen und Schwierigkeiten mit der Rezeption anspruchsvoller empirischer Untersuchungen haben, bestehen die Hochschullehrenden – gerade wenn sie sich einem Paradigma fachdidaktischer Forschung verpflichtet fühlen – auf methodischer Prüfung praktischer Rezepte, der Entwicklung und wissenschaftlichen Begründung didaktischer Ansätze als

der Grundlage für aufgeklärtes und reflektiertes unterrichtliches Handeln und nicht zuletzt auf einer Offenheit gegenüber naturwissenschaftsdidaktischen Forschungsergebnissen.“ Allerdings ist in der vorliegenden Untersuchung zu erkennen, dass Studenten nicht nur auf direkte praktische Umsetzung fachlichen Wissens in fachdidaktischen Veranstaltungen drängen, sondern auch großen Wert auf das Verständnis der Konzepte und Interpretationen legen.

Teil III.

Konzeption Seminar zur Didaktik der Quantentheorie

In diesem Teil der Arbeit wird die Konzeption der zusätzlichen fachdidaktischen Ausbildung vorgestellt. Sie umfasst neben Implikationen, die sich aus der Theorieforschung zur Ausbildung in der Quantenphysik im Lehramtsstudium ergeben auch Konsequenzen aus der Anforderungsanalyse im vorangegangenen Teil II. Beide werden in den ersten beiden Abschnitten jeweils zusammenfassend dargestellt. Es folgt die eigentliche Konzeption mit den Leitlinien für das Fachdidaktikseminar. Diese sind zum einen die Ziele der Lehrveranstaltung, eine Zeitplanung und eine kurze Darstellung der Aufgabenstellungen und der genutzten Medien. Abschließend kommen in der Evaluation die Studenten des Pilotseminars zu Wort, welche wertvolle Hinweise für die Verbesserung der Seminargestaltung im Sinne des Design Based Research liefern.

9. Gestaltungseckpunkte für die Konzeption

9.1. Gestaltungseckpunkte aus der Theorie

Nach REINHOLD (2004, S.124) ist die physikdidaktische Ausbildung nicht genügend auf den späteren Beruf ausgerichtet, Fachwissen und Fachdidaktik bleiben oft unverbunden und sind gering inhaltlich aufeinander abgestimmt. Der fehlende Praxisbezug in der Ausbildung beruht dabei nach Meinung des Autors auf fehlenden Daten aus der Schulpraxis. Das allgemeine Ziel der universitären Ausbildung der Lehramtsstudenten sollte nach HERIEKS und KUNZE (2002, S.412) aber sein:

„Erstens sollten die einzelnen Phasen darum wissen, dass angehende Lehrerinnen und Lehrer die jeweiligen Anforderungen stets auf dem Hintergrund antizipierter Berufserwartungen und Idealbilder vom eigenen Lehrerwerden deuten und bearbeiten. Dabei werden die Bedeutungen, die Hochschullehrer, Ausbilder oder Bildungsplaner mit den Anforderungen verknüpfen, dauernd subjektiv gebrochen, beschränkt oder erweitert. Die Phasen sollten zweitens um die Struktur der objektiven Anforderungen des Lehrerberufs wissen und sie transparent zu machen versuchen. So können subjektive Deutungen und Bearbeitungen angeregt und gefördert werden, die die angehenden Lehrerinnen und Lehrer zugleich an ihren beruflichen Entwicklungsaufgaben arbeiten lassen. Mit dieser Forderung nehmen wir den Gedanken ernst, Lehrerbildung konsequent vom Berufsfeld her zu denken (vgl. OELKERS 2000, S. 126), ohne dabei zu übersehen, dass die erworbenen Qualifikationen, insbesondere die der Ersten Phase, polyvalent einsetzbar sein sollten (vgl. TERHART 2000, S. 72f.).“

Für die fachdidaktische Praxis in der Physik heißt das:

„Ein fachdidaktisches Curriculum in der Ersten Phase der Lehrerausbildung würde dann ein grundlegendes, gut strukturiertes und vernetztes fachdidaktisches Fachwissen auf den Stufen Faktenwissen/Reflexion/Kommunikation/Urteil (vgl. Terhart, 2002) und ein Beispielwissen auf den Stufen Analyse und Bewertung/Planung/Erprobung/Evaluation (vgl. Brüggelmann et al., 2000) beinhalten.“

ten.“(REINHOLD, 2004, S.134)

Das Zitat von Reinhold beschreibt die explizite Differenzierung der beiden Phasen der Lehrerbildung und gibt Hinweise, was die erste Phase im allgemeinen, aber natürlich auch speziell für die Ausbildung in moderner Physik bei angehenden Physiklehrern leisten kann. LERSCH (2006) unterstützt die Thesen Reinholds: „Wenn aber die gesamte Lehrerbildung an Standards orientiert werden soll, die Kompetenzen beschreiben, müssten auch bereits in der 1. Phase professionsspezifische Fähigkeiten angezielt und erworben werden können, die über ein bloßes ‚Kennen von ...‘ hinausgehen und damit erst wirklich als Vorstufen für den folgenden Entwicklungsverlauf angesehen werden können.“

Zunächst wird bei Reinhold die Stufe des Faktenwissens genannt, welche sowohl die Fachkonzepte, im Fall dieser Arbeit die der Quantenphysik im physikfachlichen Bereich, als auch grundlegende Unterrichtsplanung, Unterrichtsmethodik und allgemeines Wissen über Schülervorstellungen umfasst. Dieses Wissen sollte aus der Vorlesung zur Theoretischen Physik und den Grundvorlesungen und -seminaren der Fachdidaktik vorhanden sein.

Als Ziel des Fachdidaktikseminars folgt unter Nutzung der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion die Reflexion quantenphysikalischer Konzepte und zugehöriger Schülerpräkonzepte und daneben die Kommunikation und Beurteilung fachgebietsspezifischer didaktischer Vermittlungsmethoden und Unterrichtsgänge im ersten Teil. Im zweiten Teil der konzipierten Lehrveranstaltung soll das von Reinhold erwähnte beispielhafte Wissen der Planung und Koordinierung eines eigenen Unterrichtsganges in der Gruppe, sowie der Entwurf eigener Unterrichtsstunden jedes einzelnen Studenten hinzutreten. Die Konzepte werden anschließend in der Plenumsdiskussion analysiert und bewertet und durch einen anzufertigenden Bericht selbst evaluiert.

Nach dem modifizierten Modell der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion¹ sind neben der fachlichen Klärung sowie den bereits erstellten Unterrichtskonzepten im schulischen und hochschulischen Bereich die studentischen Vorstellungen ein wesentlicher Punkt zur Entwicklung von Unterrichtsleitlinien für die Lehramtsausbildung.

Fachliche Klärung

In der fachlichen Klärung im Rahmen der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion ergaben sich folgende, wesentliche Konzepte der Quantenphysik zur Behandlung im Seminar:

- Interferenzfähigkeit, Unbestimmtheit/Komplementarität und Information
- Verschränkung
- Eigenschaftsbegriff, Präparation, Wahrscheinlichkeitsaussagen und Zustandsreduktion/Messung

Wesentlich ist die Herausarbeitung des Unterschieds zwischen Konzepten der klassischen Physik und der Quantenphysik. Für das Seminar in der Lehramtsausbildung werden neben den Konzepten experimentelle Umsetzungen von früheren Gedankenexperimenten und

¹ Siehe Abschn. 2.3 sowie LOHMANN (2006) und VAN DIJK und KATTMANN (2007)

Anwendungen der Quantenphysik als Themen integriert. Dabei werden sowohl Analogexperimente als auch Interaktive Bildschirmexperimente genutzt. Es werden unterschiedliche Interpretationen der Quantenphysik vorgestellt.

Schüler- und Studentenvorstellungen

Das Herausarbeiten von möglichen Modifikation inadäquater Konzepte von Studenten und Schülern ist für die Entwicklung eines universitären Konzepts wichtig. Zunächst wird aber eine Analyse problematischer Vorstellungen benötigt.

Zusammenfassend lassen sich die problematischen Konzepte charakterisieren als das Beibehalten einer klassischen, realistischen Perspektive. Diese zeigt sich beispielsweise durch das Verharren im Bohrschen Atommodell, der Vermutung eines Energieverlustes beim Tunneln (WITTMANN et al., 2005), aber auch in der klassischen Annahme eines Bahnbegriffes und der damit verbundenen permanenten Lokalisierung von Quantenobjekten (MÜLLER und WIESNER, 1997). Dass die Studentengruppen mit diesen Vorstellungen keine Minderheit darstellen, konnte beispielsweise durch die Clusteranalyse von IRESO (1999) bestätigt werden, wobei durch eine multidimensionale Skalierung² das absolute im Gegensatz zum dualen Denken, im Sinne quantenphysikalischer Komplementarität, sowie das deterministische Denken und einfache Atomvorstellungen im Vergleich zum adäquaten komplexen Atommodell und indeterministischer Mechanik als drei mögliche Problembereiche identifiziert wurden.

Dies sind Beispiele für das nicht vorhandene konzeptionelle Verständnis (ROBERTSON und KOHNLE, 2010), welches sich auf die theoretische Ausbildung mit einem hohen Anteil an formalen Rechnen ohne mentalem Konzept (BAILY und FINKELSTEIN, 2010b) und fehlender Besprechung der Interpretationsmöglichkeiten der Konzepte zurückführen lässt. Hinzu kommt, dass die didaktischen Möglichkeiten der Vermittlung und das adäquate Reagieren in kritischen Unterrichtssituationen, wozu die Analyse von Schülervorstellungen auch einen wichtigen Beitrag liefert, den Studenten selten bekannt ist, wie u.a. auch die Anforderungsanalyse (Kap. II) zeigt.

Im folgenden Abschnitt wird erläutert, wie die vorgestellten schulischen und hochschulischen Lehrkonzepte versuchen, diese Probleme zu lösen.

Forderungen aus Schul- und Hochschulkonzepten

² „Multidimensionale Skalierung (MDS) bezeichnet eine Familie von Verfahren, die Objekte des Forschungsinteresses durch Punkte eines mehrdimensionalen Raums (MDS-Lösung) so darstellen, dass die Distanz zwischen je zwei Punkten in diesem Raum einem gegebenen Nähe-, Abstands-, Ähnlichkeits- oder Unähnlichkeitswert (Proximität) dieser Objekte so genau wie möglich entspricht. Als Proximitäten lassen sich außerordentlich viele Funktionen verwenden wie etwa Korrelationen der Objekte über ihre Ausprägungen auf verschiedenen Variablen (z.B. die Interkorrelationen verschiedener sozialer Gruppen in Bezug auf eine Batterie von Eigenschaften); direkt erhobene globale Ähnlichkeitsratings für Paare von Objekten (z.B. Beurteilungen verschiedener Länder durch eine Person auf einer Skala von „sehr ähnlich“ bis „sehr verschieden“); oder co-occurrence Koeffizienten, die messen, wie oft ein Ereignis zusammen mit einem anderen auftritt (z.B. wie oft kommt Verbrechen X zusammen mit Verbrechen Y vor, relativ zur Gesamthäufigkeit von X und Y).“ (WOLF und BEST, 2010, S.391)

Das *Münchner Modell* (WIESNER, 2008) und damit ebenso milq (MÜLLER et al., 2001; DAMMASCHKE et al., 2010) stellen die konsistente Begriffs- und Konzeptentwicklung, wie bei der Präparation quantenmechanischer Zustände oder dem Messprozess, in den Vordergrund und behandeln ausführlich die Modellbildung, wie die Unterschiede zu klassischen Theorien. Quantenobjekte, Photon und Elektron, werden innerhalb eines Spiralcurriculums gleichberechtigt behandelt. KOOPMAN et al. (2005) betont die Wichtigkeit, Konzepte explizit zu diskutieren: „Furthermore it is questionable if the approach used by Griffiths (2005) [Standardlehrbuch im englischsprachigen Hochschulbereich, Anm.d.Verf.] to first teach students to do quantum mechanics, and then teach them what it means, is successful.“ Das von ROBERTSON und KOHNLE (2010) erläuterte mangelhafte konzeptionelle Verständnis kann durch die ausführliche Diskussion der Interpretationsmöglichkeiten quantenphysikalischer Konzepte im Seminar verbessert werden. POSPIECH (2004) schlägt psychologische Bilder als Möglichkeit zur Verankerung von Konzepten vor. Die konsistente Konzeptbildung, z.B. der Begriffe des *Zustandes* und des *Messprozesses*, aber vor allem auch die Herausarbeitung der Unterschiede von Quantenphysik und klassische Theorien im Seminar ist an WIESNER (2008) angelehnt.

In anderen Modellen kommt die Diskussion der philosophischen Aspekte der Quantenphysik, wie Interpretationsmöglichkeiten, Nachdenken über Realität, Ontologie und Epistemologie, hinzu. Laut BAILY und FINKELSTEIN (2010a,b) hat die Einstellung des Dozenten einen wesentlichen Einfluss auf interpretative Haltung der Studenten. Sie stellen zusammenfassend fest: „We find students are more likely to prefer realist interpretations of quantum-mechanical systems when instructors are less explicit in addressing student ontologies. We also observe contextual variations in student beliefs about quantum systems, indicating that instructors who choose to address questions of ontology in quantum mechanics should do so explicitly across a range of topics.“ Dozenten kennzeichnen Interpretationen oft nicht als das, was sie sind - eben Interpretationen. Ohne explizite Erklärung behalten Studenten ihre gewohnte realistische Perspektive bei. BAILY und FINKELSTEIN (2012) schlagen eine Seminargestaltung vor, die Unterschiede zwischen klassischer und quantenphysikalischer Sichtweise explizit aufzeigt und moderne quantenphysikalische Experimente implementiert. BAILY und FINKELSTEIN (2009, S.7) kommen zu dem Schluss: „how students develop and apply a quantum or realist perspective can depend on the instructional approach, learning goals, and tools used for teaching students.“ Daher ist es notwendig, verschiedene Interpretationen explizit zu lehren und nicht bei solchen vom Anfang des letzten Jahrhunderts stehenzubleiben. Die Diskussion ermöglicht außerdem die Einbeziehung der Studentenperspektive als wesentliche Komponente der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion. POSPIECH (2004) betont den tiefen Einfluss der Quantentheorie auf das Denken über Realität und Objektivität. Sie schlägt die Untersuchung des Verhaltens von Quantenobjekten über quantenphysikalische Strukturen vor, von denen u.a. die Unbestimmtheit eine wichtige Komponente bildet. Die Bevorzugung des philosophischen Zuganges biete laut Pospiech das höchste fachdidaktische Potential.

Das Seminar erläutert fachdidaktische Ansätze zur Behandlung von Schülervorstellungen und zur Einführung quantenphysikalischer Konzepte, wobei Unterschiede zur klassischen Physik gelehrt und Interpretationsmöglichkeiten innerhalb der Quantenphysik vorgestellt werden.

Wie das Frankfurter und das Dirac-Modell bedient sich der konzipierte Kurs der Optik als Grundlage für Analogieexperimente, insbesondere für qualitative Erklärungen, die formale Erklärungen verdeutlichen sollen. Dabei können zum Beispiel Zweizustandssysteme, wie der Spin, mit Hilfe von doppelbrechenden Kristallen und Polarisationsfolien modellhaft dargestellt werden. Dies dient außerdem der Vermeidung klassisch-mechanischer Analogien. Das Bohrsche Atommodell und seine Bedeutung für die Schule wird Gegenstand der Diskussion im Seminar sein. Einige Autoren schlagen vor, dieses ganz aus dem Lehrplan zu streichen (IRESON, 1999, S.199), da laut GRECA und FREIRE (2003) es den Kontakt mit strikt quantenphysikalischen Konzepten verhindert und die Tendenz zur unpassenden Analogiebildung bei Schülern stärkt.

KALKANIS et al. (2003) sehen die mathematischen Kenntnisse der Studenten als großes Problem an und schlagen Dozenten deshalb vor, die für das Verständnis der Quantenphysik notwendigen Konzepte mit denen der Studenten abzugleichen und gegebenenfalls am Anfang des Kurses einzuführen. Dies steht allerdings im Gegensatz zu den Erfahrungen der befragten Studenten in der Anforderungsanalyse. Sie sehen das Problem eher in der Klärung der Konzepte bzw. ihrer Interpretation selbst und nicht im Formalismus. Allerdings nehmen Dozenten ebenfalls Probleme mit mathematischen Grundlagen bei den Lehramtsstudenten wahr. Für das Seminar werden formale Grundlagen daher nur dann wiederholt, wo es unbedingt notwendig für das Verständnis erscheint.

MICHELINI und STEFANEL (2009) sehen drei wesentliche Zugänge zur Quantenphysik: eine historische Einführung, die Konstruktion des Formalismus über Analogien mit klassischen Situationen und der Zugang über grundlegende Konzepte. Letzterer wird von den Autoren bevorzugt und kann beispielsweise dem Vektorzugang von Dirac als Referenz folgen. Die Konzepte werden über Analogieexperimente als Darstellungsform für Observable und linearen Operatoren beispielsweise mit Polarisationsfiltern vermittelt. Der Formalismus wird auf diesen Konzepten aufgebaut und seine Rolle in der Quantenmechanik herausgearbeitet. Konzeptionell ähnlich verfährt POSPIECH (2004) bei ihrem Ansatz auf Schulniveau. Die Materialien des Dirac-Konzeptes konnten erfolgreich als Weiterbildung im Blended-Learning-Design für Lehrer im Verbund an 15 italienischen Hochschulen unter der Führung der Universität Udine³ genutzt werden. Ein Schwerpunkt der Weiterbildung war die Gestaltung des eigenen Unterrichts. Analog werden im konzipierten Seminar schulische Unterrichtsgänge mit individuell geplanten Unterrichtsstunden erarbeitet.

Allen vorgestellten Kursen gemeinsam ist ein hoher Praxisbezug durch Vermittlung quantenphysikalischer Prinzipien über moderne Anwendungen, wie Kryptografie, Teleportation

3 Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento (IDIFO) Didaktische Innovation und Trends in der Physik

oder Quanteninformationsverarbeitung. Solche Anwendungen, wie die Quantenkryptographie und der Quantencomputer, werden im Seminar erläutert und ihre Darstellung im Schulunterricht behandelt.

ZOLLMAN et al. (2002) schlagen hinsichtlich der Medienwahl interaktive Computerexperimente und Visualisierungen⁴ vor. Diese interaktiven Medien konnten mit Erfolg eingesetzt werden: „Visual Quantum Mechanics materials have been successful in teaching some abstract concepts to students who have limited science and mathematics background.“ (ZOLLMAN et al., 2002) Dies ist auch auf eine hohe Aktivierung der Studenten als wichtiger Lernfaktor (DESLAURIERS und WIEMAN, 2011) zurückzuführen: „We measured the impact of pedagogical approach both on the original conceptual learning and on long-term retention. The cohort of students who had a very highly rated traditional lecturer scored 19% lower than the equivalent cohort that was taught using interactive engagement methods“ Im konzipierten Kurs kommen Simulationen als Ersatz für nicht zur Verfügung stehender quantenphysikalischer Experimente, beispielsweise in der Behandlung des Mach-Zehnder-Interferometers als Quantenradierer als Einzelphotonenexperiment, zum Einsatz (PEREIRA et al., 2009). KOHNLE et al. (2015) bestätigen ebenfalls die Nützlichkeit von Simulationen und verweisen auf ihre umfangreiche Simulationssammlung.

Zur spielerischen Darstellung des EPR-Experimentes und speziell von GHZ-Zuständen wird ein Spiel im Seminar vorgestellt.

9.2. Gestaltungseckpunkte aus der Anforderungsanalyse

Quantenphysikalische Konzepte werden schon stark in den Vorlesungen geklärt, die wichtigsten von Dozenten hervorgehobenen Konzepte, wie das statistische Verhalten, die Komplementarität und die Messung in der Quantenphysik könnten aber dennoch in einem zusätzlichen Seminar gefestigt und fachdidaktisch nutzbar gemacht werden. Neuartige, aus der eigenen Schulzeit ungewohnte Konzepte, wie die Verschränkung, und Anwendungen, wie Quantenkryptographie, können in die eigene Lehrpraxis der Lehramtsstudenten Eingang finden, wenn diese nur ansprechend aufbereitet werden. Sie sind aber seltener Vorlesungsinhalte und daher als Ergänzungsstoff geeignet. Wie lassen sich die Ergebnisse der Anforderungsanalyse für die Konzeption des Zusatzseminars nutzen?

Zuallererst ist zu erkennen, dass formale Aspekte in den Theorievorlesungen aus Dozentensicht ausreichend, aus studentischer Sicht sogar von einem großen Teil als übermäßig vorhanden wahrgenommen werden. Daher ist eine Behandlung des Formalismus im Seminar nur bei Themen wie der Verschränkung notwendig, die vorher explizit nicht Gegenstand der Theorievorlesung waren und deren mathematischen Grundlagen somit nicht vorhanden

⁴ *Visual Quantum Mechanics - The Original* - für Nebenfachstudenten geplanter Basiskurs mit fünf Modulen zu je 6 bis 12 Stunden und vertiefter Kurs *VQM-The Next Generation* für mathematisch stärker vorgebildete Studenten

sind. Die hinter dem mathematischen Formalismus verborgenen Konzepte sind dagegen ein so wesentlicher Bereich des fachlichen Wissens zur Quantenphysik, dass eine Auffrischung und Vertiefung ein wichtiger Bestandteil des Seminars sein sollte, auch wenn sie aus Dozenten- wie aus Studentensicht schon stark in den Vorlesungen behandelt werden. Bei den Grundkonzepten kann sich für das Seminar an KÜBLBECK und MÜLLER (2002) orientiert werden, da deren Konzepte im Dozentenfragebogen bestätigt werden konnten. Der Welle-Teilchen-Dualismus wird, wie im letzten Abschnitt gesehen, nicht nur von den meisten Ausbildungskonzepten für die Hochschule abgelehnt, sondern wird auch von den befragten Dozenten als nicht wesentlich angesehen. Hinzu kommt aus Sicht der Studenten der Wunsch nach weiterführender Klärung physikalischen Modellbildung und von Interpretationsfragen quantenphysikalischer Konzepte.

Dazu kommt ein mittlerer Bedarf der Studenten an Beispielen und praktischen wie experimentellen Anwendungen, wiederum ergänzend, transferierend und vertiefend zu den Theorievorlesungen, so dass die quantenphysikalischen Konzepte praxisnah in den Unterricht eingebaut und erläutert werden können. Dabei sind auch moderne Anwendungen wie Quantenkryptografie oder -informationsverarbeitung für Studenten interessant, wenn diese nur ansprechend eingeführt werden. Relevant für angehende Lehrer ist es auch, sich selbst neue Beispiele mittels quantenphysikalischer Prinzipien erarbeiten zu können.

Ein ähnlicher Bedarf zeigt sich bei historischen Aspekten der Quantenphysik. Die geschichtliche Linie wird, zumindest in groben Zügen, in allen Vorlesungen der Theorie nachvollzogen. Wesentliche Experimente, wie beispielsweise zur Hohlraumstrahlung, dem Photoeffekt oder dem Franck-Hertz-Versuch sind oft Bestandteile der Vorlesung. Daher könnten, müssen aber nicht, verschiedene geschichtliche Stationen vertiefend nachvollzogen werden. Laut GRECA und FREIRE (2003) sind historische Betrachtungen dahingehend ungenügend, dass sie sich auf die Entwicklung zwischen 1900 und 1920 konzentrieren und falsche konzeptuelle Modelle und ein verzögertes Verständnis und Interesse hervorrufen. Die fachdidaktischen Ansichten über dieses Thema gehen auseinander, viele akademische Fortbildungen lehnen ein historisch-genetisches Vorgehen ab (z.B. MICHELINI et al., 2007), allerdings gibt es auch Gegenpositionen (siehe beispielsweise CARR und MCKAGAN, 2009). Wesentlich ist eine Transformation des in den Theorievorlesungen erworbenen und in gewissen Aspekten, wie der Verschränkung vertieften Fachwissens, in praxisnah verfügbares Wissen. Die Anforderungsanalyse zeigt von Seiten der Studenten einen hohen Bedarf an praxisnahen fachdidaktischem Wissen zur Konzeption von Unterrichtsgängen und Ausgestaltung von Themen der Quantenphysik. Hinzu kommt als wesentliche Komponente das Erkennen von Schülervorstellungen, ihre Analyse und adäquates Reagieren im unterrichtlichen Handeln. Das ist vor allem daher wichtig, da diese Ziele zwar teilweise von Dozenten in ihren Vorlesungen angestrebt, aber nicht umgesetzt werden und die Lehramtsstudenten sich kaum auf dem Schuldienst vorbereitet fühlen. Diese Perspektive von Studenten ist allerdings nach (KREUTZMANN, 2003) nicht immer realistisch und ein Aufbrechen der Schülerperspektive aus ihrer Sicht notwendig. Daher ist in dem konzipierten Seminar

nicht nur die Vorstellung unterschiedlicher Unterrichtsgänge, sondern auch ihre kritische Diskussion vorgesehen.

Hinsichtlich der verschiedenen Leistungsgruppen von Studenten schlägt GRAMZOW et al. (2011) besonders für die Gruppe des leistungsschwachen Profils vor, dass „Ausbildungsteile angeboten werden, die speziell auf deren Bedürfnisse zugeschnitten sind, eventuell mit einer Reduzierung fachlicher Komplexität zu Beginn, sodass Studenten dieses Profils ihr Wissen von einem niedrigeren Niveau beginnend entwickeln könnten.“ Bei den schulpraktisch orientierten Studenten wäre ein „besserer Zugang zum Fachwissen über pädagogische oder fachdidaktische Kontexte möglich, um der schulpraktischen Orientierung und den Interessen der Studenten mit diesem Profil gerecht zu werden. So wäre eine Vermittlung des Fachstoffes mit deutlichem Bezug zum späteren Unterricht oder im Zusammenhang mit fachdidaktischen Fragestellungen vorstellbar.“ Vor allem dieser Typ kann von dem fachdidaktisch orientierten Seminar stark profitieren. Für den Fachenthusiasten sehen GRAMZOW et al. (2011) auf Grund der hohen kognitiven Leistungsfähigkeit und Flexibilität keinen Förderbedarf.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass formale Aspekte bis auf das Konzept der Verschränkung ausreichend behandelt werden, aber, wie auch bereits aus der Theorie abgeleitet, Erläuterungen der hinter dem mathematischen Formalismus verborgenen Konzepte als Bestandteil des Seminars Berücksichtigung finden sollten. Die Behandlung von Beispielen, wie auch praktischen und experimentellen Anwendungen, beispielsweise der Quantenkryptografie ist im Interesse der Studenten wie auch der Dozenten.

Aus der Anforderungsanalyse folgt, dass es eine Transformation des erworbenen und vertieften Fachwissens in praxisnahes verfügbares fachliches und fachdidaktisches Wissen im Sinne der Didaktischen Rekonstruktion geben muss, wobei der Behandlung von Schülervorstellungen und Planung und Durchführung eigener Unterrichtssequenzen eine besondere Bedeutung zukommt.

10. Konzeption

Die zeitliche Strukturierung des geplanten Seminars finden sie im Abschnitt 10.2 auf Seite 132. Zunächst werden aber im folgenden Abschnitt die sich aus den Gestaltungseckpunkten ergebenden kompetenzorientierten Ziele des Seminars formuliert. Die Behandlung der Seminarthemen zu wichtigen Quantenphysik-Konzepten zu Erkennen und das adäquate Reagieren auf Schülervorstellungen und der daraus bestimmten Konzeption von Lernsequenzen, wird durch die Aufgabenstellungen (siehe 262 ff) zur kognitiven Aktivierung der Studenten unterstützt. Abschließend wird in diesem Kapitel der erste Durchlauf des Seminars kurz evaluiert und die Anregungen der Studenten zur weiteren Verbesserung beschrieben.

10.1. Ziele der Lehrveranstaltung

Die Lehrveranstaltung hat zwei substanzielle Ziele: Zum einen die Vertiefung der in der Vorlesung der theoretischen Quantenphysik erworbenen Fachkenntnisse und des weiteren dem Aufbau und der Erweiterung fachdidaktischer Kompetenzen durch die angehenden Lehrer in diesem speziellen Gebiet.

Fachliches Wissen

Die Studenten:

- analysieren und verstehen die Unterschiede zwischen klassischer Mechanik und Quantenphysik, wie Fragen nach der Lokalisierbarkeit oder der Identität von Quantenobjekten.
- kennen und verstehen die für die Schule wichtigen quantenphysikalischen Konzepte der Komplementarität/Unbestimmtheit, der Superposition/Interferenz, der Präparation und des statistischen Verhaltens beim Messprozess, des Spins und der Verschränkung.
- können Beispiele für die technische Anwendung dieser Konzepte, wie Quantencomputer und -kryptografie, geben.
- kennen neben dem Stern-Gerlach-Versuch, den Taylor- und Jönsson-Versuch¹, das

¹ als Doppelspaltexperimente mit Einzelphotonen bzw. Elektronen

Mach-Zehnder-Interferometer und den Aspect-Versuch als wichtige Experimente der Quantenphysik und

- beurteilen die verschiedenen Interpretationsmöglichkeiten der Quantenphysik wie die Kopenhagener Deutung, die Viel-Welten-Theorie oder die Bohrsche Mechanik.

Fachdidaktisches Wissen

Die Studenten:

- wissen, wie man wesentliche Konzepte der Quantenphysik vermitteln könnte.
- beurteilen verschiedene Vermittlungskonzepte
- kennen und analysieren die Schwierigkeiten im Lernprozess, das Schülervorverständnis und Schülervorstellungen und -fehlkonzepte
- kennen Methoden, um auf Schülervorstellungen reagieren zu können.
- kennen passende Methoden und Medien zum Lehren der Quantenphysik und können diese in geeigneten Kombinationen einsetzen.

10.2. Strukturierung des Seminars

Das konzipierte Seminar gliedert sich grundlegend in drei verschiedene Abschnitte, den genauen zeitlichen Ablauf finden Sie auf Seite 260 im Anhangskapitel 29. In der ersten Lehrveranstaltung werden vor dem eigentlichen Seminar neben der Erstellung der für die Evaluation notwendigen Concept Maps und Fragebögen, Ziele der Lehrveranstaltung und ihre Schulrelevanz geklärt. Am Ende des Semesters werden ebenfalls ein Fragebogen zum Ausfüllen verteilt und Concept Maps angefertigt. Hinzu kommt die Reflexion und studentisches Feedback zum Kurs.

Der **erste Teil** des Seminars ist ein eher theoretisch angelegter fachlicher und fachdidaktischer Input zu Grundideen der Quantenphysik.

Entscheidend für die Steigerung der fachdidaktischen Kompetenz ist die didaktische Rekonstruktion quantenphysikalischer Grundideen durch die Studenten. Dazu gehören die fachliche Einordnung, die Behandlung von Schülervorstellungen und -konzepten mit Analyse und adäquatem Reagieren in Unterrichtssituation, als auch die sich daraus ergebenden Leitlinien für die eigene Unterrichtsgestaltung.

Im ersten Thema mit zwei Doppelstunden werden allgemein die Grundideen der Quantenphysik am Doppelspaltversuch erläutert. Denn wie schon FEYNMAN et al. (1993) bemerkte: „Das Doppelspaltexperiment enthält das ganze Geheimnis der Quantenmechanik. Sämtliche Paradoxe, Geheimnisse und Absonderlichkeiten der Natur sind darin enthalten. Bei jeder x-beliebigen anderen Situation in der Quantenmechanik genügt dann der Hinweis: Sie erinnern sich an das Experiment mit den zwei Löchern.“ Hinzu kommt als alternativer

Versuch das Mach-Zehnder-Interferometer, auch in Form eines Quantenradierers, und dessen Nutzung in der Schule. Nach kurzer Wiederholung der Diracnotation können dann verschiedene Konzepte der Quantenmechanik erläutert werden. Zum einen ist das die phänomenologische Beschreibung von Zwei-Zustands-Systemen, wie des Spins und zum anderen die Superposition von Zuständen und die Problematik des Messprozesses.

Im *zweiten Thema des ersten Teils* wird die theoretische Beschreibung des Spins vertieft und dann die Grundidee der Unbestimmtheit stärker erläutert. Nach der Diskussion einer fachlichen korrekten, wie auch schulnahen Definition der Unbestimmtheit folgt eine ausführliche Behandlung passender Modellexperimente, wie beispielsweise des Quantenradierers, auch unter Nutzung von Simulationsexperimenten. Danach kann die Brücke zum Messprozess geschlagen und verschiedene im Zusammenhang zur Unbestimmtheit auftretende Interpretationsprobleme diskutiert werden. Es schließt sich die gemeinsame Erarbeitung möglicher Bilder und Analogien zu Unbestimmtheit/Komplementarität an, um diese Grundidee besser dem Schüler verdeutlichen zu können. Zum Schluss dieses Themas folgt eine realistische Anwendung der Prinzipien zur Verschlüsselung mit der relativ einfachen One-Time-Pad-Verschlüsselung mit Hilfe des BB84-Algorithmus.

Als neue, den Studierenden unbekannte Grundidee wird als drittes Thema die Verschränkung in zwei Doppelstunden eingeführt. Das EPR-Experiment wird dargestellt und dabei die Bellsche Ungleichung in vereinfachter Form erläutert. Auch hier schließt sich wieder eine Diskussion interpretatorischer und schulrelevanter Probleme an. Es werden verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten wie Animationen oder das GHZ-Spiel² vorgestellt. Letztgenanntes thematisiert spielerisch den Widerspruch zwischen klassischer und Quantenphysik. Es gibt vier Kartenserien zu je vier Karten, welche den Spinzustand im Bezug zu einer Messbasis darstellen. Diese sind quantenphysikalisch verträglich, in einer lokalen Theorie führen sie allerdings zu Widersprüchen. Die Spieler versuchen nur verträgliche Eigenschaften zu messen und so die Klassik „gewinnen“ zu lassen. Dass zwei nicht verträgliche Eigenschaften nicht gleichzeitig gemessen werden können, veranschaulicht dieses Spiel ohne den schwierigen mathematischen Apparat bemühen zu müssen.

Es folgen mit Schrödingers Katze und der Teleportation zwei für Schüler interessante Beispiele. Als Anwendung wird die Kryptografie mit verschränkten Zweiphotonensystemen unter Nutzung des Ekert91-Algorithmus gezeigt. Schließlich werden zwei Lehrgänge und ihre Herangehensweise an das Thema Verschränkung verglichen.

Der **zweite Teil** umfasst die Diskussion verschiedener Unterrichtskonzepte und vertieft das Thema der Schülerschwierigkeiten. Nach dem Kennenlernen des Milq-, des Dirac-Konzepts aus Udine und dem Konzept der ETH-Zürich³ wird erläutert, was Quantenphysik für Schüler, aber auch (Lehramts-)Studenten schwierig macht. Es folgt die Bewertung von

² nach den Experimenten von Greenberger, Horne und Zeilinger, Details bei POSPIECH (2004, S.171f) und POSPIECH (2016, S.33-35)

³ Leitprogramm zum eigenständigen Lernen mit Grundlagen- und Vertiefungsteil, wobei das erworbene Wissen mit Testfragen eigenständig überprüft werden kann.

Schülerantworten und wie mit Hilfe dieser Lernschwierigkeiten korrekt eingeschätzt werden können. Dadurch wird eine Überprüfung des Schülerverständnisses und ein adäquates Reagieren in kritischen Unterrichtssituationen möglich. Ein Beispiel sind die Schwierigkeiten, die bei der Behandlung der Bohrschen Postulate auftreten können. Durch die Vorbereitung der Studenten mit Hilfe eines Arbeitsblattes⁴ konnte dann im Seminar ausführlich darüber diskutiert werden, ob diese im eigenen Unterricht, eventuell mit Modifizierungen, behandelt würden oder Alternativen gesucht werden müssten.

Zuletzt werden Medien wie Lehrbücher, Simulationen, Arbeitsblätter und Lehr-DVDs⁵ im Hinblick des Reagierens auf Schülerkonzepte analysiert.

Der letzte, wichtige **dritte Teil** im Umfang von drei Doppelstunden dient der Entwicklung eines eigenen Unterrichtsganges und einzelner, darin enthaltener Unterrichtsstunden. Nach Entwicklung und Abstimmung eines Lehrganges innerhalb eingeteilter Gruppen, entwickeln die Studenten in Einzelarbeit eine eigene Unterrichtsstunde. Die folgenden zwei Doppelstunden dienen dann der Präsentation des selbst entwickelten Lehrkonzeptes als Prüfungsleistung.

Das Seminar versucht viele verschiedene Aspekte des Themas zu berücksichtigen, dadurch entsteht ein straffer und anspruchsvoller Zeitplan. Je nach Voraussetzungen der Studenten ist ggf. eine Kürzung der Inhalte für folgende Durchgänge des Seminars anzuraten, wobei die praktischen Anteile trotzdem erhalten bleiben sollten.

⁴ Siehe Arbeitsblatt 30 auf Seite 264

⁵ siehe beispielsweise (HEUSLER, 2010)

Aufgabenstellungen und genutzte Medien

In diesem Abschnitt sollen kurz die im Seminar genutzten Medien dargestellt werden. Alle Medien waren über einen Onlinekurs⁶ oder im Handapparat⁷ jedem Studenten leicht zugänglich. Für eine Vertiefung der einzelnen Themen konnten die ergänzenden Literaturhinweise genutzt werden. Insbesondere die Arbeitsblätter, welche Sie im Kapitel 30 auf Seite 261 finden, dienten zur Vorbereitung der Studenten verschiedener Themen vor dem Seminar und damit der Schaffung eines gemeinsamen Wissensniveaus.

Hinzu kam der Einsatz verschiedener Simulationen, eine davon ist der Mach-Zehnder-Interferometer, die sie in Abbildung 10.1 sehen. Sie kommt in Analogiebetrachtungen zu reinen Zuständen und ihrer Superposition und damit der Betrachtung von Welcher-Weg-Informationen zum Einsatz und erlaubt ein eigenständiges Entdecken der Zusammenhänge. Das dazugehörige Arbeitsblatt finden Sie auf Seite 262. Die Materialien zum Seminar

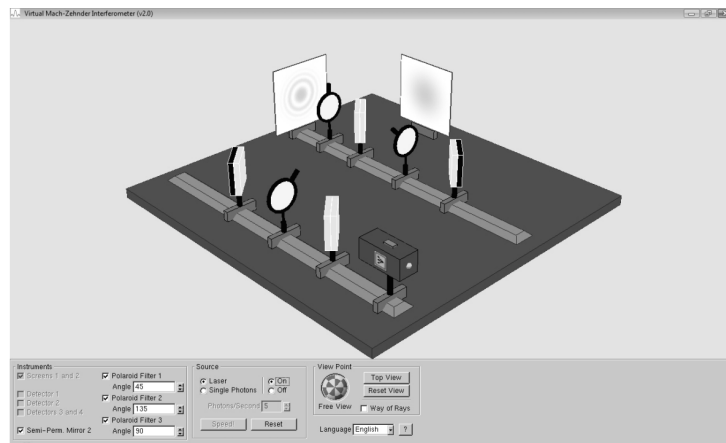


Abbildung 10.1.: Beispiel für die Simulation eines Quantenradierers mit Nutzung von drei Polarisationsfiltern (PEREIRA et al., 2009)

finden unter der folgenden URL zum Download:

www.researchgate.net/publication/282576465_Materialien_Fachdidaktikseminar_Quantenphysik

⁶ Auf dem Arbeitsblatt mit [OL] gekennzeichnet.

⁷ Mit [HA] in den Literaturangaben gekennzeichnet.

10.3. Verbesserungsvorschläge der Teilnehmer des Pilotseminars

Nach dem ersten Durchlauf des Seminars wurden die fünf teilnehmenden Studenten um eine kurze Rückmeldung gebeten. Dieses Gruppeninterview wurde aufgenommen, transkribiert und nach MAYRING (2010) durch Paraphrasierung, Reduktion und schließlich Generalisierung zusammengefasst.

Auf fachlicher Seite wurde die Behandlung und Einordnung von Konzepten mit zugehörigen Vorstellungen von den Studenten als positive Ausgangspunkte angesehen, da so veraltete Begriffe aufgelöst werden können. Gelobt wurde die Verständlichkeit, allerdings wäre eine noch ausführlichere Behandlung der fachlichen Grundlagen teilweise wünschenswert. Kritisiert wurde, dass partiell die Vorwissenserwartungen zu hoch waren und die verwendeten Fachbegriffe stärker hätten erarbeitet werden sollen, bevor sie reflektiert und damit abstrahiert wurden. Die Lösungen der Aufgaben und die Zusammenhänge zwischen den Begriffen hätte in manchen Punkten stärker geklärt werden können, da sie nur kurz in den Physikvorlesungen angerissen wurden, diese dort oft als stures Rechnen „nach Schema F“ wahrgenommen wurden. Vorherrschend war die Empfindung der Lehramtsvorlesungen der Theoretischen Physik als eine Verkürzung von Diplom-Vorlesungen mit Weglassen wichtiger Zusammenhänge, wobei laut Aussage der Studenten für Fachphysiker Spezialwissen wichtig für Lehramtsstudenten eher Überblickwissen notwendig wäre (Siehe auch RIESE, 2009). Hinsichtlich fachdidaktischer Inhalte wurde die Darstellung von Schülerschwierigkeiten als schweres, aber auch wichtiges Thema erkannt. Als sehr wichtig erschien den Studenten die eigenständige Planung von Schulstunden innerhalb eines Unterrichtsganges, zumal dadurch für die Studenten selbst die Konzepte deutlicher wurden. Das Seminar konnte die Teilnehmer für die Probleme sensibilisieren, geeignete Analogien für quantenphysikalische Konzepte und die in den Theorievorlesungen oft nicht vorhandene Alltags- und Unterrichtsrelevanz aufzeigen und zusätzlich Quellen für die selbständige Vertiefung darlegen. Die Einführung der verschiedenen Themen durch Literatur und Arbeitsblätter im E-Learning-System Opal wurde als methodisch vorteilhaft wahrgenommen. Texte für das Eigenstudium zum Auffrischen der Fachbegriffe und ausführlichere Musterlösungen für die Arbeitsblätter hätten bei Problemen der gemeinsamen Vorwissensbasis Abhilfe schaffen können.

Die Inhalte des fachdidaktischen Kurses wurden auf Grund dieser Rückmeldungen hinsichtlich der Anzahl der Konzepte reduziert, stärker aufeinander bezogen und auf das Verstehen fokussiert. Gleichwohl bleibt die Kenntnisse der mathematischen Grundlagen notwendig. Weiterhin wurde versucht noch stärker die didaktischen Möglichkeiten mit Kernaussagen, qualitativen Formulierungen und einfachen und zentralen Beispielen aufzuzeigen, wobei Schülervorstellungen noch ausführlicher zu behandeln sind. Es wurde schließlich zusätzliche Literatur zur Bedeutung von Fachkonzepten und Musterlösungen bereitgestellt.

Teil IV.

Evaluation Seminar zur Didaktik der Quantenphysik

Nach der Bestimmung geeigneter Inhalte und Methoden für die Ausbildung von Lehramtsstudenten in der Quantenphysik und der daraus folgenden Konzeption eines didaktischen Seminars besteht die dritte Komponente dieser Arbeit in der Überprüfung der Wirksamkeit dieser Zusatzveranstaltung. Um eine umfassende Analyse zu ermöglichen, muss dabei sowohl das fachliche als auch das fachdidaktische Wissen mit Hilfe verschiedener Methoden erfasst werden. Das pädagogische Wissen (pedagogical knowledge (PK)) stellt, wie in Abschnitt 4 dargestellt, ebenfalls eine wesentliche Komponente des Professionswissens eines Lehrers dar, ist aber eher fachübergreifender Natur und wird deshalb hier nicht untersucht. Eine Facette der Evaluation ist die genaue Analyse von Problemen der Lehramtsstudenten durch Einteilung in verschiedene Wissenstypen. Ob die Konzeption des Seminars erfolgreich war, lässt sich durch den Vergleich der Seminargruppe mit Studenten erreichen, die nur die Vorlesungen in Theoretischer Physik besucht haben. Die Arbeit orientiert sich dabei bei den Fachwissenstest an MÜLLER (2003a) und speziell bei der Analyse der Concept Maps an STRACKE (2004a). Die Überprüfung des fachdidaktischen Wissens geschieht vor allem durch die Verwendung von Unterrichtsvignetten in Anlehnung an RIESE (2009) und dem zugehörigen Fragebogen (RIESE, 2008). Einen Überblick über die in der Evaluation zu erfassenden Komponenten sind in der Abbildung 10.2 im Überblick dargestellt.

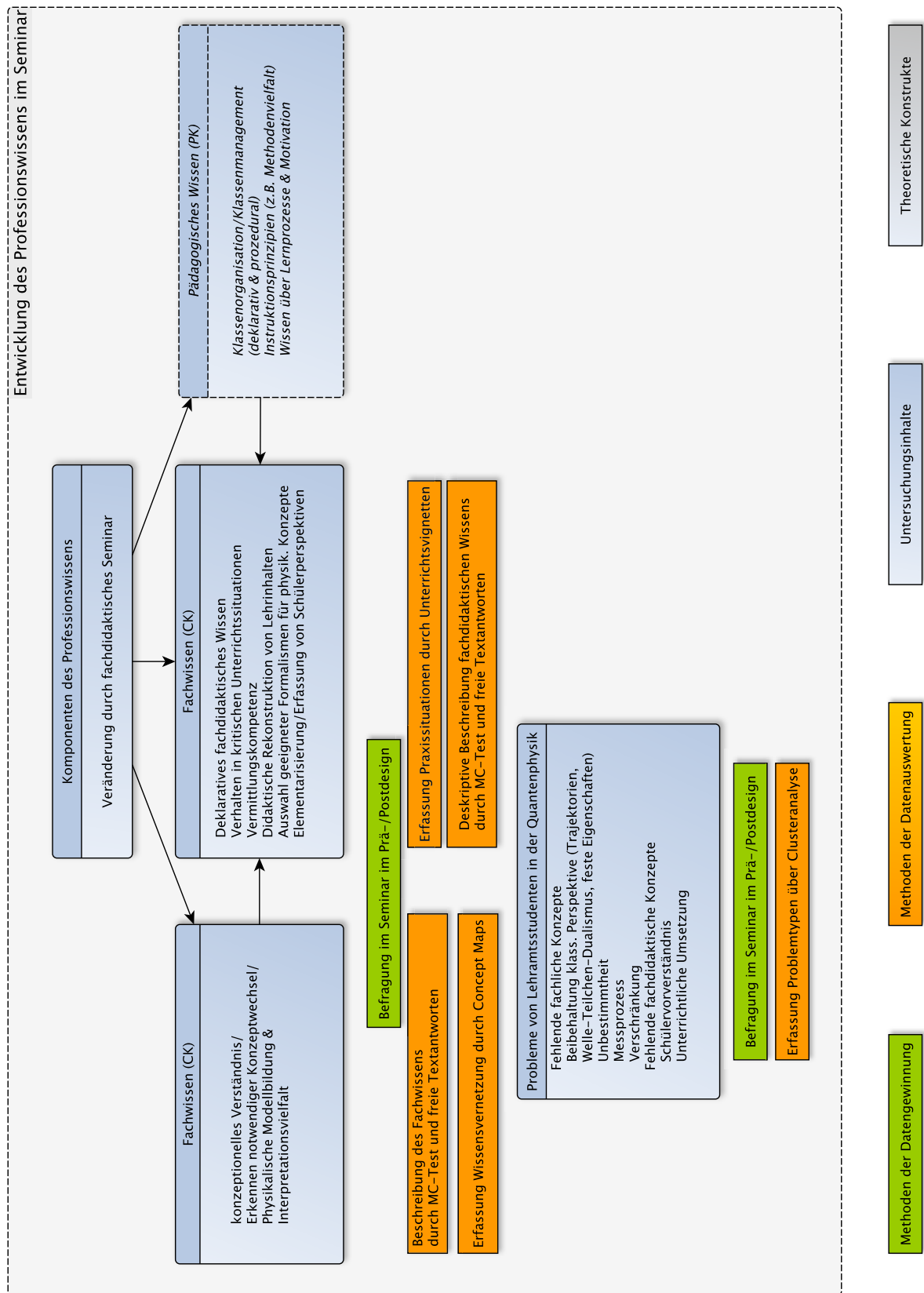


Abbildung 10.2.: Die Entwicklung des Professionswissens

11. Studiendesign

Am Anfang der Evaluation wird der Aufbau der Befragungen mit Erhebung der Rohdaten in Pilot- und Hauptstudie und die Methoden ihrer Auswertung beschrieben. Die Fragebögen enthalten neben geschlossenen und offenen Antwortformaten auch Concept Maps, welche die Möglichkeit eröffnen, das fachliche Wissen aus anderer Perspektive zu beleuchten (FISCHLER, 2000). Diese Daten werden neben der deskriptiven Beschreibung für Mittelwertsvergleiche zwischen den Gruppen und den beiden Messzeitpunkten, Berechnung von Korrelationen und eine Typenbildung durch Clusterung der Antworten genutzt. Hinzu kommt die qualitative und quantitative vergleichende Auswertung der Änderung der Concept Maps in Anlehnung an STRACKE (2004a). Es folgt ein Kapitel mit der Vorstellung noch nicht in der Anforderungsanalyse genutzter Methoden, zu dem Mittelwertsvergleiche, Korrelationen, die multiple lineare Regression mit kategorialen Variablen und Analyse von Concept Maps als Wissensnetzwerke über zentrale Parameter gehören. Das Kapitel schließt mit dem wichtigen Abschnitt der Testkonstruktion und der Analyse der Gütekriterien für die Testfragen.

11.1. Untersuchungsablauf und Stichprobe

Für die Evaluation des Seminars wurden Single-Choice-Fragen und Fragen mit offenen Antwortmöglichkeiten sowohl zum Fachwissen (content knowledge) durch Adaption des Testes von MÜLLER (2003a) als auch zum fachdidaktischen Wissen, (pedagogical content knowledge) durch auf das Themengebiet angepasste Fragen von RIESE (2008) verwendet. Die Leistungstests ermöglichen es, die studentischen Anforderungen aus Teil II auf Realisierbarkeit zur überprüfen.

Die Evaluation fand an der TU Dresden im Prä-/Post-Design mit Versuchs- und Vergleichsgruppe statt. Der Test der Vergleichsgruppe wurde in einem anderen, thematisch nicht verwandten, einsemestrigen Seminar durchgeführt. Da wie oft in der Physikdidaktik die Teilnehmerzahl in diesem Wahlpflichtseminar recht gering war, wurden drei Durchgänge des Seminars in den Wintersemestern 2011/2012 bzw. 2012/2013 und im Sommersemester 2014 ausgewertet, wobei die Homogenität von Versuchs- und Vergleichsgruppe als auch der Untergruppen durch Varianzanalyse sichergestellt werden konnte.

Die Konstruktion des Testfragebogens fand in einem zweistufigen Prozess statt, wobei eini-

ge Fragen der Pilotgruppe aus testtheoretischen Gründen, meist der Reliabilität, entfernt und Fragen zur Definition quantenphysikalischer Begriffe zur Verbesserung der Teststärke hinzugefügt wurden. Insgesamt konnten 25 Versuchs- und 11 Vergleichsfragebögen ausgewertet werden. Bei beiden Teilnehmergruppen handelt es sich überwiegend um Studenten aus den höheren Master- bzw. Staatsexamensemestern. Die Tests wurden direkt von den Studenten in Limesurvey durchgeführt oder vom Papierfragebogen kodiert und von dort im CSV-Format in *R Studio* übertragen. Die verwendeten Zusatzpakete und Optionen finden Sie im Anhang auf Seite 257 im Abschnitt 28. Die Concept Maps wurden in das Programm *Cmap Tools* und dem Zusatzprogramm *Cmap Analysis* transferiert. KOC (2012) konnte zeigen, dass es unerheblich, ob die Concept Maps gezeichnet und dann übertragen oder direkt im Computer erstellt werden. Die Leistung der Probanden ist davon unabhängig.

Stichprobenumfangsplanung

Für den Vergleich der Testwerte vor und nach dem Seminar ist nach RIESE und REINHOLD (2012, Seite 20) von einem mittleren Effekt für die Kompetenzsteigerung im fachlichen und fachdidaktischen Wissen auszugehen, der laut BORTZ und DÖRING (2006) bei $d \approx 0,5$ liegt. Geht man von einem üblichen Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ und einer guten Teststärke von $1 - \beta = 80\%$ aus, so errechnet sich mit dem R-Paket *Poweranalysis* der optimale Stichprobenumfang zu 26, falls von einer grundsätzlichen Verbesserung der Fähigkeiten im Seminar, also einer einseitigen Hypothese, auszugehen ist. Wird diese Tendenz im abhängigen t-Test offen gelassen, erhöht sich der Umfang auf 33, da dann zweiseitig getestet werden muss. Es wurden daher drei Durchgänge des zusätzlichen Seminars mit einer jeweils zu erwartenden Teilnehmerzahl zwischen zehn bis zwölf Teilnehmern durchgeführt.

11.2. Instrumente und Gütekriterien

In diesem Abschnitt werden Unterrichtsvignetten als neues Erhebungsinstrument vorgestellt. Diese sind eine Möglichkeit, praxisnahe Unterrichtssituationen in einem Pen & Paper-Test abzubilden. Hinzu kommen für den Leistungstest zum fachlichen und fachdidaktischen Wissen Methoden der Testkonstruktion und dazugehörige Gütekriterien. Zum Schluss werden Concept Maps als alternative Darstellung fachlichen Wissens vorgestellt und Auswertemöglichkeiten erläutert.

11.2.1. Unterrichtsvignetten

Bei Fragebögen stellt sich das grundsätzliche Problem, ob diese überhaupt praxisrelevantes Wissen abprüfen können. So schreiben REHM und BÖLSTERLI (2014): „Quantitativ ausgerichtete Fragebögen stehen jedoch wegen ihres Mangels an ökologischer Validität (bzw. externe Validität) in der Kritik, weil sie die handlungsrelevanten Fähigkeiten angehender Lehrkräfte nicht abbilden würden.“ Es gibt daher Bestrebungen, validere Alternativen, z.B. durch die direkte Beobachtung des Unterrichtshandelns des Lehrers mittels Videografie, zu finden. Allerdings sind diese sehr zeit- und ressourcenintensiv. Von RIESE und REINHOLD (2010) wurden daher Unterrichtsvignetten vorgeschlagen, welche zeitökonomisch, kostengünstig und trotzdem valide sind. Den angehenden Lehrern werden dabei authentische Unterrichtsszenen in schriftlicher Form beschrieben oder als Film gezeigt. Die Analyse dieser Szenen durch die Studenten lassen Rückschlüsse auf deren Kompetenzen im fachdidaktischen Bereich zu. Durch den Vergleich der Kategorisierungen der studentischen Antworten durch verschiedene Rater lässt sich damit im Vergleich zur studentischen Selbsteinschätzung der Kompetenz ein objektives, praxisnahes als auch valides und proximales Testinstrument konstruieren. Für eine Kompetenzerhebung erscheinen proximale Indikatoren als besonders erstrebenswert, weil sie die zu erhebenden Kompetenzen direkt adressieren (FREY, 2008).

RIESE (2009) fasst die verschiedenen Untersuchungen zu Unterrichtsvignetten zusammen: „Diese Studien gehen davon aus, dass sich mit Vignettentests Kompetenzen von Lehrpersonen für das tatsächliche berufliche Handeln valider abbilden lassen als mit reinen Papier-Bleistift-Tests zum fachlichen, fachdidaktischen und pädagogischen Wissen. Ein Grund hierfür ist der prinzipielle Unterschied zwischen Wissen und Können. Gerade dieser Unterschied stellt eine große Herausforderung an die Erhebungsformate der Testinstrumente dar.“ REHM und BÖLSTERLI (2014) konnten zeigen, dass der Vignettentest spezifisch für das naturwissenschaftliche Lehramt differenziert Unterschiede in der fachdidaktischen Kompetenz misst. Er ist außerdem in der Lage, die Kompetenzzunahme während des Studiums zu messen. Allerdings gibt GRAMZOW et al. (2011, S.19) zu bedenken: „Schließlich ist der Zusammenhang von Wissen und Handeln nicht trivial darstellbar, so dass

insbesondere bei der Messung prozeduralen Wissens (im verwendeten Testinstrument über schriftliche Unterrichtsvignetten realisiert) nicht klar ist, welche Wissensaspekte sich später im tatsächlichen Handeln der angehenden Lehrkräfte widerspiegeln.“

Die in dieser Arbeit verwendeten Vignetten sind advokatorisch, d.h. die Lehramtsstudenten beurteilen die dargestellte Lehr-Lern-Situation auf Verständnisprobleme der Schüler und das darauf folgende Reagieren des Lehrers. Die Qualität dieser Analyse erlaubt nach OSER et al. (2010) Aussagen über die Kompetenz der Testperson. Die Antworten auf die Vignetten sind offen gehalten, um den Realitätscharakter der Situation zu gewährleisten und so die externe Validität des Testinstrumentes zu erhöhen, gleichzeitig darf für die interne Validität die Aufgabenschwierigkeit nicht zu schwer sein. Dies wird durch konkrete Handlungsaufforderungen an die Testperson sichergestellt. Weiterhin enthalten die Vignetten zwischen drei und neun aufzufindende Schülerpräkonzepte, die erkannt und analysiert werden sollen. Mehr als neun führen zu einer zu hohen Komplexität, so dass einzelne Probleme nicht mehr erkennbar sind. Es wurden schriftliche Vignetten gewählt, da Filmvignetten für Überkomplexität anfälliger sind (REHM und BÖLSTERLI, 2014). Als Vorbild dienten Unterrichtsvignetten von RIESE und REINHOLD (2010), sie liefern mit schriftlichen Unterrichtsvignetten ein Modell zur Relevanz universitären Wissens.

Die Reliabilität wird mit der Auswertung der Antworten durch drei Rater kontrolliert, diese kodierten die Probandenurteile hinsichtlich erkannter Schülervorstellungen getrennt voneinander und zeigten eine gute Übereinstimmung von 82%.

11.2.2. Methoden zur Konstruktion des Leistungstestes und Gütekriterien

Zur Evaluation des Seminars wurde ein Leistungstest erstellt, der sowohl fachliche Items, angelehnt an MÜLLER (2003a), als auch solche zum fachdidaktischen Wissen durch Adaption des Testes von RIESE (2009, 2008) enthält, welche von der geprüften Validität der Ausgangstests profitieren können. Den Fragebogen zur Evaluation des Seminars finden Sie auf Seite 285. Die erste Itemgruppe enthält im ersten Teil eine fachliche Frage zu den Erkenntnismöglichkeiten durch Interferenzexperimente und im zweiten Teil eine fachdidaktische Frage zu deren möglichen didaktischen Funktionen. Es schließen sich Single-Choice-Fragen mit Aussagen zum quantenphysikalischen Fachwissen an, die vom Teilnehmer in ihrem Wahrheitsgehalt eingeschätzt werden müssen. Es folgt eine Frage, warum die Analyse von Schülervorstellungen notwendig ist. Diese Frage bereitet die nächste Aufgabe mit Unterrichtsvignetten vor, die Vignetten enthalten problematische Aussagen von Schülern zur Quantenphysik. Der Befragte soll diese korrekt einschätzen und mögliche Strategien zur Lenkung dieser in Richtung eines physikalischen Weltbildes erläutern.

Die nächsten beiden Items sind ebenfalls fachdidaktischer Natur, sie behandeln zum einen das Vorgehen bei der Einführung der Quantenphysik und speziell die didaktischen Mittel, um den Übergang vom Bohrschen Atommodell hin zu einem quantenmechanischen

Modell dem Schüler nahezubringen. Darauf folgt wiederum ein Itemblock von fachlichen Aussagen, die in ihrem Wahrheitsgehalt eingeschätzt werden müssen und zum Schluss soll der Testteilnehmer die Begriffe der Unbestimmtheit, des Dualismus und der Verschränkung definieren und hinsichtlich ihrer Relevanz und Lehrbarkeit in der Schule einschätzen.

Da die Fragen von Riese im fachlichen Testteil vereinfacht, als auch die fachdidaktischen Fragen von Müller an das Themengebiet der Quantenphysik angepasst werden, erfolgte im ersten Durchgang des Seminars eine testtheoretische Validierung des Fragebogens mit Hilfe einer Itemanalyse, deren Ergebnisse eine Beurteilung der Qualität, des veränderten Messinstrumentes und ggf. dessen Verbesserung erlauben. Die Güte eines Item ist durch folgende Kriterien gekennzeichnet (MOOSBRUGGER und KELAVA, 2012, S.76ff):

Ein Item mit hoher Güte:

- liefert einen hohen Beitrag zur Reliabilität, gemessen über die interne Konsistenz durch Cronbachs α als auch die externe Konsistenz der Interrater über Beurteilerübereinstimmungen bei offenen Antwortformaten,
- hat eine mittlere Schwierigkeit mit ausreichender Varianz,
- repräsentiert gut die Skala über eine ausreichende Trennschärfe,
- besitzt eine möglichst symmetrische Verteilungsform der Antworten.

Um das Konsistenzmaß Cronbachs Alpha berechnen zu können, wird die Testhalbierungsmethode zur Schätzung der internen Konsistenz auf beliebig viele Testteile verallgemeinert. Diese Konsistenz ist umso größer, je größer die durchschnittliche Korrelation zwischen den Items ist, wobei vorauszusetzen ist, dass alle Items das gleiche Merkmal messen (MOOSBRUGGER und KELAVA, 2012, S.131). Cronbachs Alpha berechnet sich nach

$$\alpha = \frac{n}{n-1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n \text{Var}(x_i)}{\text{Var}(x)} \right)$$

mit n Anzahl der Items, $\text{Var}(x_i)$ Varianz des i -ten Items und $\text{Var}(x)$ der Varianz des Gesamttests x . Werte von Cronbachs Alpha ab 0,7 werden als akzeptabel angesehen (MOOSBRUGGER und KELAVA, 2012, S.135ff). Bei kürzeren Skalen mit sechs Aufgaben oder weniger werden in der Literatur auch noch Werte ab $\alpha = 0,6$ verwendet (BLÖMEKE, 2008). Bei stark unterschiedlichen Itemvarianzen wird Cronbachs α z-standardisiert. Problematisch ist dieser Parameter α aber bei heterogenen Tests, da dann die Reliabilität unterschätzt wird. Guttmanns Lambda λ_6 ist dann ein besserer Schätzer.

Die Interrater-Reliabilität wird durch unabhängiges Kategorisieren der offenen Studentenantworten bei guter Übereinstimmung sichergestellt. Durch die Kategorisierung wird eine numerische Bewertung der offenen Antworten festgelegt, Werte über 70 % gelten als angemessen. Um gute Werte zu erhalten, ist ein vierkomponentiger Kodierleitfaden mit der Bezeichnung der Kategorie, der Definition der Kategorie, Beschreibung von Kodierregeln und authentischen Anker- und Abgrenzungs-Beispielen essenziell. HAMMANN und JÖRDENS (2014) führen aus: „Die Entwicklung eines Kodierleitfadens ist wesentlich

für die Umwandlung von offenen Antworten in Daten, die statistisch analysiert werden können. Der Kodierleitfaden ermöglicht die Zuordnung vielgestaltiger Antworten zu einer begrenzten Anzahl von Antwortkategorien.“ Die Kategorien können deduktiv oder induktiv bzw. in einer Mischform durch die Antworten in Pilotfragebögen oder Vorschlägen von fachdidaktischen Experten gewonnen werden.

Die Items dürfen weder zu einfach noch zu schwierig sein. Die Schwierigkeit kann über den Schwierigkeitsindex¹ angegeben werden, welcher ungefähr bei 50 liegen sollte. Dieser mittlere Wert liefert außerdem eine gute Itemvarianz, um möglichst viele verschiedene Leistungsstufen der Probanden differenzieren zu können.

Die Trennschärfe kennzeichnet die Differenzierbarkeit der Testleistungen der Probanden auf Basis des Testwertes eines bestimmten Items im Verhältnis zur Basis des Testwertes aller Items². Eine hohe Trennschärfe zeigt, dass das Item ähnlich differenziert wie der Gesamtestwert, Werte ab 0,3 bis 0,4 gelten als gut.

Die Verteilungsform der Items, die möglichst einer Normalverteilung entsprechen sollte, kann sowohl grafisch als auch über die Angabe der Schiefe beurteilt werden

Eine Optimierung des Testes geschieht nun dadurch, dass zum einen eine hohe Übereinstimmung der Interrater bei der Kodierung der Antwortkategorien durch Neuformulierung oder Präzisierung erreicht wird. Zum anderen sollten Items mit zu geringer Reliabilität, Schwierigkeit (Boden- bzw. Deckeneffekte) oder Trennschärfe entfernt werden.

Gütekriterien für den fachlichen Anteil

Ein wesentlicher Punkt, um statistisch auswertbare Antwortdaten zu erhalten, ist die verlässliche Einordnung der Antworten in Lösungskategorien. Dafür wurden drei Ratern typische, offene Antworten der Testteilnehmer der Pilotbefragung vorgelegt und diese getrennt nach Richtigkeit bewertet. Die Interrater-Reliabilität bei diesem unabhängigen Kategorisieren zeigt mit 82 % eine gute Übereinstimmung. Dies gilt neben dem fachlichen ebenfalls für den fachdidaktischen Teil.

Die Inhaltsvalidität kann zum großen Teil darüber gesichert werden, dass es sich bei den fachlichen und fachdidaktischen Item um Modifikation des Fragebogens von MÜLLER (2003a) bzw. RIESE (2009, 2008) handelt. Für diese wurde bereits „theoretisch begründet und anhand von Plausibilitätsüberlegungen erläutert, inwieweit die verwendeten Items des Tests das theoretische Konstrukt abbilden.“ (KRÜGER et al., 2014, S.108)

1 „Der Schwierigkeitsindex P_i eines Items i ist der Quotient aus der bei diesem Item tatsächlich erreichten Punktsomme aller n Probanden und der maximal erreichbaren Punktsomme, multipliziert mit 100.“ (MOOSBRUGGER und KELAVA, 2012, S.76)

2 Genauer bei MOOSBRUGGER und KELAVA (2012, S.84): „Die Trennschärfe r_{it} eines Items i drückt aus, wie groß der korrelative Zusammenhang zwischen den Itemwerten x_{vi} der Probanden und den Testwerten x_v der Probanden ist. Der Testwert x_v eines Probanden v wird dabei üblicherweise als Zeilensumme sämtlicher Itemwerte x_{vi} des Probanden v gebildet.“

In der Tabelle 11.1 ist die Konsistenz mit der Angaben über die interne Konsistenz der Rohdaten mit Hilfe von Cronbachs α_R , der standardisierten Form α_S , die statt auf Kovarianzen auf Korrelationen beruht, sowie das alternative Konsistenzmaß λ_6 angegeben. Die zweite Tabelle 11.2 enthält Angaben über die Trennschärfe, im Mittel erreichte Testwerte und die Schwierigkeit als Verhältnis von im Mittel erreichten und maximalen Testwert. Die Verteilungsform der Items kann mit Hilfe der in der Tabelle angegeben Schiefe und den grafischen Darstellungen der Items in Abbildung 11.1 beurteilt werden.

Tabelle 11.1.: Interne Konsistenz der Rohdaten

α_R	α_S	λ_6
0.64	0.59	0.69

Tabelle 11.2.: Trennschärfe und Verteilung der Testitems

	Trennschärfe	Mittelwert	Standardabw.	Schiefe	Schwierigkeit
Fachwissen 1 ³	0.06	2.92	0.29	-2.65	0.97
Intferenzexp. ⁴	0.31	1.58	0.51	-0.30	0.79
Fachwissen 2 ⁵	0.79	3.58	1.00	-0.21	0.72
Fachwissen 3 ⁶	0.45	3.92	0.79	0.12	0.78
Fachwissen 4 ⁷	0.41	3.42	1.16	-2.03	0.85

Die interne Konsistenz lässt sich nach (BLÖMEKE, 2008) noch als ausreichend bezeichnen, zumal es ein bekanntes Phänomen ist, dass sehr heterogene Items wie Multiple-Choice-Fragen zu quantenphysikalischen Konzepten einerseits und offenen Fragen nach Funktion quantenphysikalischer Experimente andererseits geringe interne Konsistenz zeigen (siehe hierzu beispielsweise MOOSBRUGGER und KELAVA, 2012, S.135). Dies zeigt auch der deutlich bessere Wert der Konsistenz bei Guttmans λ_6 . Eine leichte Verbesserung ließe sich, wie in Tabelle 11.3 ersichtlich, durch Ausschluss der Items *Fachwissen 1* und *Erkenntnis aus dem Interferenzexperiment* erreichen.

Die Trennschärfen liegen außer bei den ersten beiden Items im guten Bereich. Die geringe Trennschärfe von *Fachwissen 1*, sowie dessen große Schiefe und sehr geringe Schwierigkeit sprechen für den Ausschluss dieser Variable. Ebenfalls zu leicht ist die Variable *Fachwissen 4*, bei sonst guten Kennwerten, daher wird auch sie ausgeschlossen. Hinzu kommt, dass die einzelnen Items der ersten und vierten Fachfragengruppe keine Varianz zeigen und daher als Testinstrumente ungeeignet sind.

3 Atomvorstellung

4 Physikalische Erkenntnisse aus einem Interferenzexperiment

5 Welle- & Teilcheneigenschaften und Bahnbegriff

6 Eigenschaftsbegriff und Determinismus

7 Präparation und Unbestimmtheit

Tabelle 11.3.: Änderung der Reliabilität bei Ausschluss des Items

	α_R	α_S	λ_6
Fachwissen 1	0.68	0.69	0.72
Intferenzexp.	0.63	0.62	0.70
Fachwissen 2	0.32	0.28	0.36
Fachwissen 3	0.56	0.44	0.54
Fachwissen 4	0.61	0.55	0.62

Tabelle 11.4.: Änderung der Reliabilität bei Ausschluss des Items, nach Ausschluss der Items Fachwissen 1 & 4

	α_R	α_S	λ_6	Trennschärfe
Intferenzexp.	0.77	0.78	0.64	0.64
Fachwissen 2	0.21	0.23	0.13	0.87
Fachwissen 3	0.43	0.51	0.34	0.78

Die interne Konsistenz verbessert sich durch den Ausschluss auf ausreichende $\alpha_R = 0.66$ und könnte durch das Weglassen der Fragestellung zu Erkenntnissen aus dem Interferenzexperiment auf gute $\alpha_R = 0.77$ verbessert werden. Da dieses Testitem aber eine gute Schwierigkeit und nach dem Ausschluss der beiden anderen Itemgruppen sehr gute Trennschärfe zeigt, wird zur Abdeckung der fachlichen Breite das Item im Test belassen. In der Fragegruppe *Fachwissen 2 und 3* wurden zwei Items bzw. ein Item, die ebenfalls keine Varianz aufwiesen, entfernt. Bei einem Item wies eine negative Trennschärfe darauf hin, dass die Frage ungünstig formuliert war und falsch verstanden wurde. Daher wurde auch diese Frage aus dem Test entfernt. Nach der Modifikation zeigt die Variable Fachwissen nun eine angenäherte Normalverteilung im Kerndichtediagramm (Abb. 11.2).

Zur Erhöhung der Reliabilität wurden für die folgenden Fragebögen Definitionen von Unbestimmtheit, Dualismus und Verschränkung als Komponenten des fachwissenschaftlichen Test hinzugenommen und zusätzlich um die Frage nach der Relevanz und der Lehrbarkeit ergänzt.

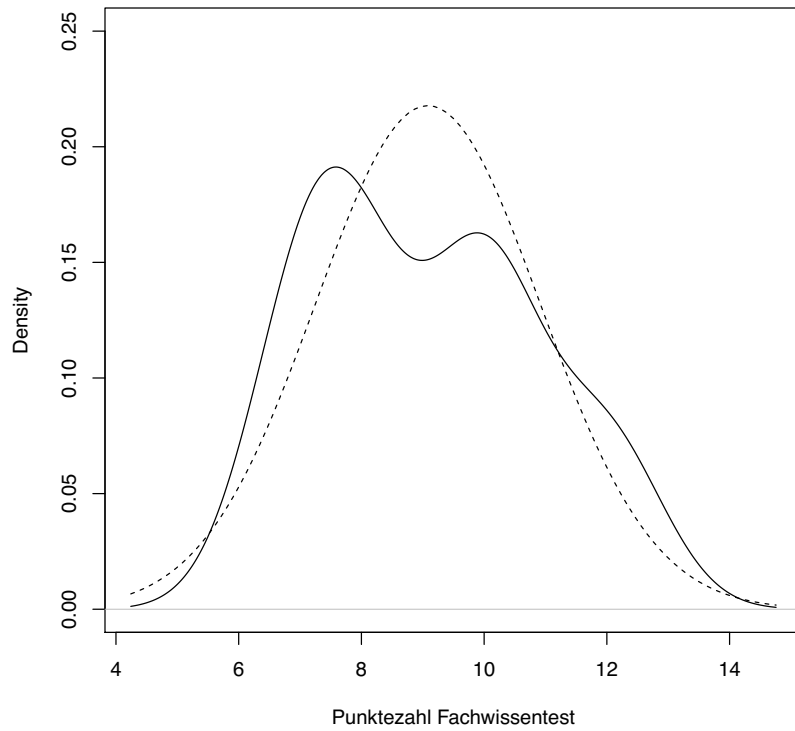


Abbildung 11.2.: Kerndichtediagramm Fachwissen, Normalverteilung gestrichelte, Realwerte durchgezogene Linie

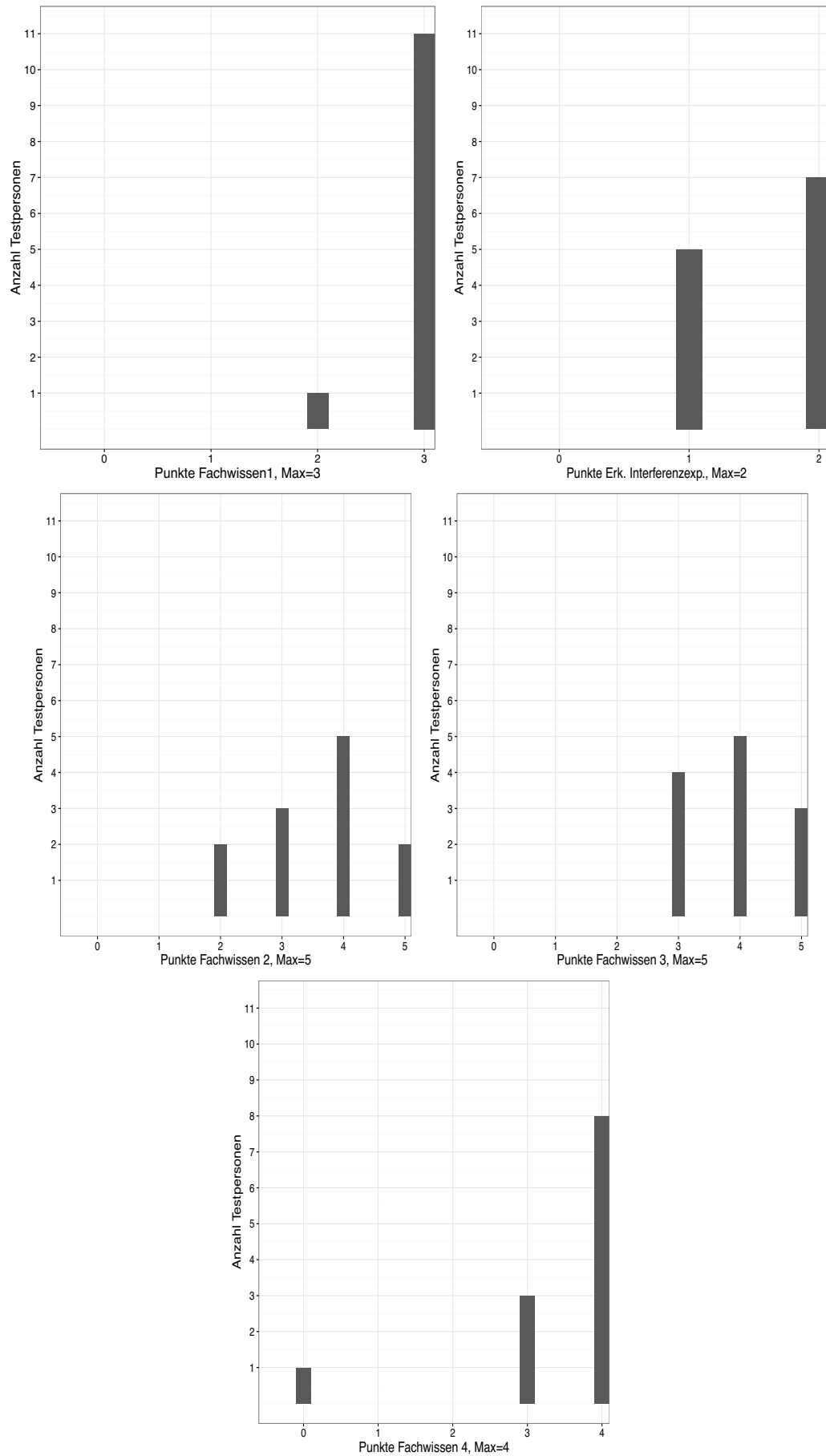


Abbildung 11.1.: Antwortverteilung der Testitems Fachwissen

Gütekriterien für den fachdidaktischen Anteil

In den Tabellen 11.5 sehen Sie zum einen die Angaben über die interne Konsistenz der Rohdaten mit Hilfe von Cronbachs α_R , der standardisierten Form α_S sowie das alternative Konsistenzmaß λ_6 . Die zweite Tabelle 11.6 enthält Angaben über die Trennschärfe, im Mittel erreichte Testwerte und die Schwierigkeit als Verhältnis von im Mittel erreichten und maximalen Testwert. Die Verteilungsform der Items kann mit Hilfe der in der Tabelle angegebenen Schiefe und den grafischen Darstellungen der Items in Abbildung 11.3 beurteilt werden.

Tabelle 11.5.: Interne Konsistenz der Rohdaten

α_R	α_S	λ_6
0.64	0.66	0.71

Die interne Konsistenz kann als ausreichend bezeichnet werden, dahinter ist eine hohe Heterogenität des Testes zu vermuten, vor allem da der Pilotfragebogen mit den Elementen *Experiment* und *Rekonstruktion* allgemein-fachdidaktische neben speziellen fachdidaktischen Fragen zu Quantenphysik enthält. Auf Grund seiner Allgemeinheit zeigen diese Fragen zu den Zielen des Experimentes in der Physik und den Methoden der Didaktischen Rekonstruktion nur eine geringe Gemeinsamkeit mit den anderen Items. Es muss daher geprüft werden, diese Items zur Verbesserung der internen Konsistenz zu entfernen, wie auch Tabelle 11.7 nahelegt, da sich die Entfernung der Items positiv auf die Reliabilität auswirkt. Gerade der heterogenitätsunabhängigere Indikator λ_6 zeigt nach Entfernung von Experiment eine deutliche Erhöhung. Hinzu kommt, dass diese beiden Items durch die hohe Schiefe eine ungünstige Antwortverteilung und mit über 90 % Lösungswahrscheinlichkeit eine zu geringe Schwierigkeit besitzen. Beide Fragen wurden daher für die Auswertung entfernt. Ebenfalls entfiel für die Hauptstudie die Frage zu den Vor- und Nachteilen bei der Einführung der historisch-genetischen Einführung der Quantenphysik, da sich keine Varianz in den Antworten zeigte.

Tabelle 11.6.: Trennschärfe und Verteilung der Testitems

	Trennsch.	Mittelw.	Standardabw	Schiefe	Schwierigkeitsindex
Experiment ⁸	0.13	2.83	0.39	-1.57	0.94
Interferenz ⁹	0.66	1.08	1.00	-0.15	0.54
Rekonstruktion ¹⁰	0.28	6.67	0.39	-1.57	0.92
Schülervorstellungen ¹¹	0.70	6.21	1.86	-0.27	0.73
Bohr ¹²	0.53	1.21	0.78	-0.25	0.60

Tabelle 11.7.: Änderung der Reliabilität bei Ausschluss des Items, nach Ausschluss von *Experiment* und *Rekonstruktion*

	α_R	α_S	λ_6
Experiment	0.67	0.72	0.75
Interferenz	0.46	0.53	0.52
Rekonstruktion	0.65	0.64	0.67
Schülervorstellungen	0.49	0.52	0.49
Bohr	0.54	0.59	0.64

Tabelle 11.8.: Änderung der Reliabilität bei Ausschluss des Items

	α_R	α_S	λ_6	Trennschärfe
Interferenz	0.58	0.73	0.58	0.81
Schülervorstellungen	0.48	0.49	0.33	0.91
Bohr	0.72	0.81	0.68	0.77

Die interne Konsistenz verbessert sich durch die Kürzung auf gute $\alpha_R = 0.72$ bzw. $\alpha_S = 0.77$. Eine Analyse der Subitems der Schülervorstellungen zeigte, dass die erste allgemeine Frage zu Schülervorstellungen nicht zur Reliabilität beiträgt und nur eine geringe Trennschärfe aufweist. Der Grund ist in der Unähnlichkeit dieser Frage mit den restlichen Fragen zu suchen; das Item wurde daher für die weiteren Analysen entfernt.

8 Allgemeine Funktion des Experimentes im Physikunterricht

9 Didaktische Funktion eines Interferenzexperimentes im Quantenphysikunterricht

10 Allgemeine Frage zur Didaktischen Rekonstruktion

11 Unterrichtsvignetten über Schülervorstellungen zur Quantenphysik

12 Veränderungsmöglichkeiten in Richtung eines quantenmechanisch adäquaten Modells

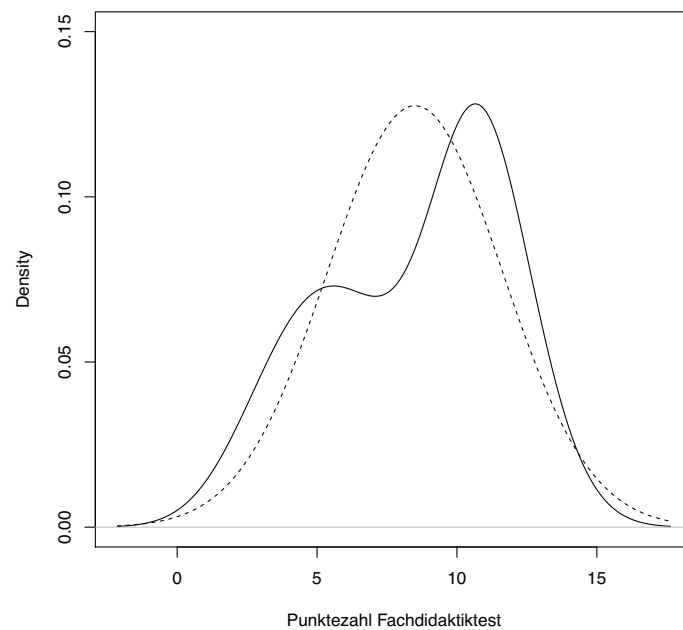


Abbildung 11.4.: Kerndichtediagramm Fachdidaktikwissen, Normalverteilung gestrichelte, Realwerte durchgezogene Linie

Nach der Modifikation zeigt die Variable Fachdidaktikwissen nun eine angenäherte Normalverteilung im Kerndichtediagramm (Abb. 11.4).

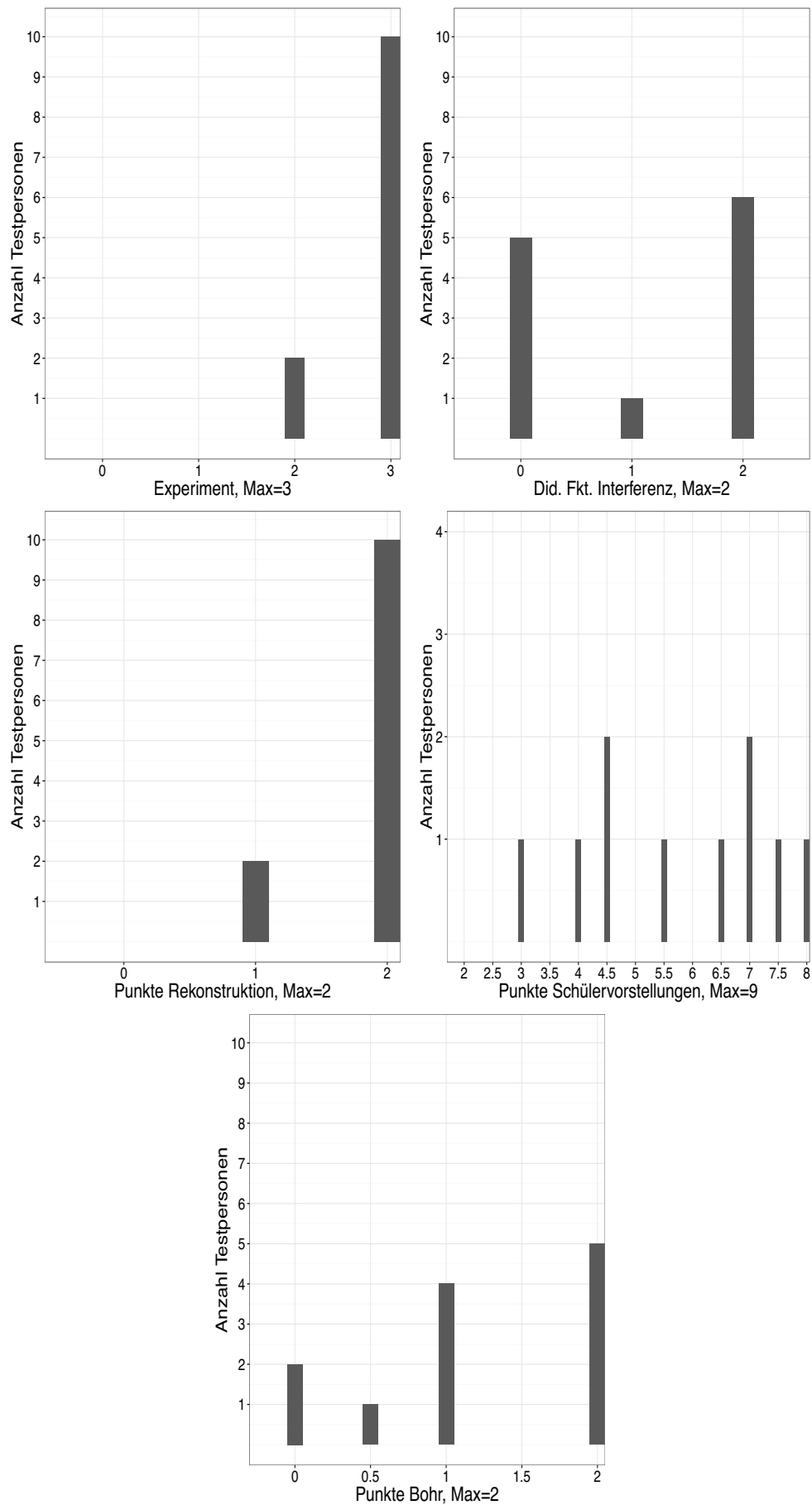


Abbildung 11.3.: Antwortverteilung der Testitems Fachdidaktikwissen

11.2.3. Concept Maps

Concept Maps (CM)¹³ sind nach STRACKE (2004b, Kap.2) „Netzwerke aus Begriffen (in Form von Knoten) und beschrifteten Relationen (in Form von Pfeilen mit bestimmten Label) zur Darstellung von Wissensstrukturen.“ Die kleinste Einheit, zwei Begriffe mit zugehöriger Relation, wird Proposition genannt. RUIZ-PRIMO und SHAVELSON (1996) führen zu diesen genauer aus: „A proposition is the basic unit of meaning in a concept map and the smallest unit that can be used to judge the validity of the relation (line) drawn between two concepts.“ Alle Begriffe sind meist, zumindest indirekt, miteinander vernetzt. Sie müssen im Gegensatz zu Mindmaps nicht streng hierarchisch aufgebaut sein, jeder Begriff (Concept) kann mit jedem anderen vernetzt und die Verbindungen mit Labels beschriftet sein. Der zugehörige Begriff des *Mapping* kann nach KRÜGER et al. (2014, S.326) „einfach definiert werden als der Prozess des graphischen Darstellens von Wissensbeständen bzw. Beziehungen zwischen Begriffen.“ Für die Analyse über graphentheoretische Parameter sind Concept Maps auch als gerichtete, benannte Graphen beschreibbar (KRÜGER et al., 2014, S.334).

Nach Krüger werden beim Concept Mapping zwei ungeprüfte Annahmen getroffen:

1. Die nichtlineare Struktur der Concept Maps korrespondiert mit der Wissensstruktur im Gehirn des Lernenden.
2. Diese mentale Wissensstruktur kann in Concept Maps transformiert werden.

Es herrscht Einigkeit, dass Wissen nicht in einzelnen Elementen vorliegt, sondern verbunden ist und Struktur besitzt (FISCHLER, 2000), eine einheitliche kognitive Theorie zur mentalen Repräsentation existiert allerdings nicht. Concept Maps sind eng mit Netzwerkmodellen als Bestandteile kognitiver Theorien verknüpft, vor allem mit der Theorie des Lernens durch Einsicht, ein subsumatives Lernen durch progressive Differentiation nach Ausubel. Sie können Teilaspekte des kognitiven Systems modellieren (NOVAK, 1998). Daneben gibt es auch Verbindungen mit der Theorie der semantischen Modelle, vor allem hinsichtlich der Strukturierung durch Präpositionen.

Diese Begriffslandkarten lassen sich sowohl für die Unterrichtsentwicklung, als Lehrmittel/Lernhilfe (HATTIE, 2009) als auch zur Diagnose, insbesondere bei der Entdeckung von Schüler- bzw. Studentenvorstellungen, einsetzen. KRÜGER et al. (2014, S.329) stellen den Einsatz als Diagnoseinstrument tabellarisch dar. Es wird genutzt, dass Concept Maps in der Lage sind Wissensrepräsentationen anders abzubilden, als klassische Pen & Paper-Tests. So schreibt BOUJAOUDE (2011, S.3): „Furthermore, concept maps have been used as assessment tools because they measure dimensions different from those revealed by traditionally used assessment instruments.“ Allerdings kann dadurch die Validität des Verfahrens ebenfalls nur schwer beurteilt werden, weil es sich schwierig gestaltet, eine geeignete Referenzmethode zu finden. Nach FISCHLER (2000) muss eine mangelnde

¹³ zu dt. Begriffslandkarte, teilweise auch Begriffsnetz genannt

Übereinstimmung mit herkömmlichen Maßen aber nicht gegen das Verfahren sprechen, da es die traditionellen Methoden zur Untersuchung des Begriffsverständnisses gerade erweitert.

Nach dem Konstruktivismus erschafft jeder Mensch auf „Grundlage seiner bisher gesammelten Erfahrungen und Lernerlebnisse individuell subjektive Bedeutungseinheiten und in der Gesamtheit eine kognitive Struktur. Jedes neue Ereignis, mit dem man konfrontiert wird, wird mit der vorhandenen kognitiven Struktur abgeglichen.“ (KRÜGER et al., 2014, S.325) Für die Konzeption von Lehr-Lern-Prozessen ist es notwendig, die individuellen Verständnisstrukturen valide und differenziert abzubilden. Da geschlossene Formate nur Wissen erfassen, welches durch die Fragestellung und die Antwortmöglichkeiten impliziert vorgegeben wird, bleiben das umfassende Konzeptverständnis und Schwierigkeiten mit diesem unbemerkt. Offene Formate sind schwierig valide auszuwerten und erfassen nur den zum Testzeitpunkt präsenten Wissensstand. Als Alternative hat sich die Auswertung von Concept Maps bewährt.

Sie dienen in der vorliegenden Forschungsarbeit als paralleles, überwiegend qualitatives Erhebungsinstrument zur Vertiefung der bereits vorgestellten Testinstrumente (TASHAKKORI und TEDDLIE, 2010, S.20ff), werden aber auch zusätzlich quantitativ nach verschiedenen Strukturparametern ausgewertet. Solch ein Vorgehen wird auch von KRÜGER et al. (2014, S.331) vorgeschlagen: „Eine quantitative Auswertung von Concept Maps hat sich für viele wissenschaftliche Fragestellungen als nützlich erwiesen; flankierend ist es aber in vielen Fällen sinnvoll, qualitative Analysen ergänzend durchzuführen, um die individuelle Begriffsstruktur von Lernenden weitergehend zu erfassen.“ Für diese Arbeit werden auf der Ebene der Lernenden der Wissenserwerb und Conceptual-Change-Prozesse durch Unterricht im Vergleich von Vorher- und Nachher-Maps analysiert und das konzipierte Seminar evaluiert.

Das Instrument wurde in einem zweistufigen Prozess entwickelt: Die wichtigsten Konzepte und Präpositionen wurden in einer Pilotstudie gesammelt, generalisiert und in der Hauptstudie vorgegeben. Dadurch verringert sich die Schwierigkeit für Personen mit geringeren sprachlichen Fähigkeiten, die Studienteilnehmer konnten sich voll auf den Aufbau der Struktur konzentrieren und es kann eine bessere Vergleichbarkeit der Maps erreicht werden (RUIZ-PRIMO und SHAVELSON, 1997). Die Struktur der Map selber wurde nicht vorgegeben, so dass es sich um einen halboffenen Typ handelt (KRÜGER et al., 2014, S.330f). Die Concept Maps wurden von den Studenten selbst auf Papier gezeichnet. Laut KOC (2012, S.666) hat die Art der Erstellung der Concept Maps, ob mit dem Computer oder mit Papier und Bleistift keinen Einfluss auf die Konstruktion. Die Beschreibung der Analyse der Concept Maps finden Sie im Abschnitt 11.3.3 erläutert.

11.3. Auswertemethoden

In diesem Kapitel kommen, neben den bereits in der Anforderungsanalyse behandelten Methoden zur Testkonstruktion, Mittelwertsvergleiche, Korrelationen, damit eng zusammenhängend die multiple lineare Regression mit (teilweise) kategorialen Variablen und Analyse von Concept Maps über zentrale Parameter und qualitativer Beurteilung hinzu. Für die Auswertung der Parameter der Testkonstruktion innerhalb der Klassischen Testtheorie werden die Funktionen des R-Paket *Psych* genutzt.

11.3.1. Methoden zum Vergleich von Mittelwerten

Bei Mittelwertsvergleichen unterscheidet man zwischen dem Vergleich von zwei oder von mehreren Gruppen. Sie sind Spezialfälle des allgemeinen linearen Modells, welches auch die später vorgestellten Korrelations- und Regressionsrechnungen umfasst. Der t-Test ist ein Hypothesentest mit t-verteilter Zufallsgröße und prüft anhand des Mittelwertes einer Stichprobe, ob sich der Mittelwert der zugeordneten Grundgesamtheit entweder von einem bestimmten vorgegebenen Wert (Einstichprobentest), die Mittelwerte zwei unabhängiger Grundgesamtheiten anhand zweier Stichproben oder sich die mittlere Differenz der Messwerte zweier abhängiger Stichproben unterscheiden¹⁴. Alle drei Tests setzen normalverteilte Grundgesamtheiten bzw. Differenzen beim abhängigen t-Test voraus, es sei denn, die Stichprobenumfänge sind so groß, dass der zentrale Grenzwertsatz erfüllt ist. Hinzu kommt bei den unabhängigen Stichproben die gleiche Varianz der Grundgesamtheiten (BORTZ und SCHUSTER, 2010, S.118ff). Die Normalverteilungsannahmen kann mit Hilfe des standardisierten Q-Q-Plots oder analytisch beispielsweise mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test mit Lilliefors-Korrektur geprüft werden. Sollte sie verletzt sein, so lassen sich nichtparametrische Verfahren wie beispielsweise der Wilcoxon-Test sowohl für unabhängige (Rangsummentest) als auch für abhängige (Vorzeichen-Rang-Test) einsetzen. Da sich nichtparametrische Tests auf asymptotische Verteilung für die Prüfgröße stützen, lohnt bei kleinen Stichproben der Einsatz exakter Tests, wobei die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Prüfgröße und kritische Werte auf Grund der Daten der vorliegenden Stichprobe berechnet wird. Die Nachteile nichtparametrischer Tests liegen in ihrer geringeren Teststärke und bei exakten Tests in ihrem hohen Rechenaufwand. Die Varianzgleichheit wird mit Hilfe des Levene-Tests geprüft, ist sie verletzt, so bietet der Welch-Test einen adäquaten Ersatz.

Bei statistischen Untersuchungen, wie dem Test der Wirksamkeit einer Maßnahme, ist aber nicht nur wichtig, ob sich etwas geändert hat, sondern wie stark diese Änderung ist, diese lässt sich mit Hilfe von Effektmaßen darstellen. Das Effektstärkemaß Cohens d vergleicht zwei Mittelwerte bezogen auf die gleiche Gruppenvarianz. Die dimensionslose

¹⁴ Es wird die Nullhypothese der Mittelwertsgleichheit getestet und mit Wahrscheinlichkeiten unter $\alpha = 5\%$ oder $\alpha = 1\%$ abgelehnt.

Zahl hängt damit nicht mehr von den Maßeinheiten und der Stichprobengröße der Ursprungsmessung ab und ermöglicht somit auch den Vergleich der Veränderungen zwischen zwei unterschiedlichen Untersuchungen. Sind die Varianzen in den Gruppen nicht gleich, so wird diese als Mittelwert der beiden Varianzen geschätzt, so dass sich folgende Formel für das Effektmaß ergibt:

$$d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{(s_1^2 + s_2^2)/2}} \quad (11.1)$$

Bei ungleich großen Gruppen wird im Nenner die gepoolte Varianz verwendet:

$$s = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (11.2)$$

mit den üblichen empirischen Varianzen s_i .

Ab einen Wert von $d = 0.2$ wird von einem kleinen, ab 0,5 von einem mittleren und ab 0,8 einem großen Effekt (RASCH et al., 2010, S.66ff) gesprochen.

Die Varianzanalyse erweitert t-Tests um die Möglichkeit, mehrere Gruppen auf Mittelwertsunterschiede zu überprüfen. Sie umfasst allerdings eine Vielzahl statistischer Verfahren, welche die Varianz einer oder mehrerer Zielvariablen durch den Einfluss von einen oder mehreren Einflussvariablen (Faktoren mit Faktorstufen als Kategorien eines Faktors) zu erklären. „Die einfaktorielle Varianzanalyse überprüft die Auswirkung einer gestuften, unabhängigen Variablen auf eine abhängige Variable.“ (BORTZ und SCHUSTER, 2010, S.205)

Der Mittelwertsvergleich stellt nun mit einer nominalskalierten Gruppenvariable auf intervallskalierte Zielvariable die einfachste Form der Varianzanalyse dar. Die Prüfgröße des Verfahrens testet, ob Varianz zwischen den Gruppen größer als die Varianz innerhalb der Gruppe ist, wodurch diese signifikant unterschieden werden können. Die Varianzanalyse erfordert dieselben Voraussetzungen wie der t-Test (Details bei BORTZ und SCHUSTER, 2010, S.212ff), auch hier muss Varianzhomogenität (Heteroskedastizität) und Normalverteilung der Vorhersagefehler (Residuen) vorliegen, welche mit den gleichen Tests geprüft werden können. Die Nullhypothese lautet auf Mittelwertgleichheit aller Gruppen, so dass dieses Verfahren Unterschiede in den Erwartungswerten feststellen kann. Welche Gruppen sich aber unterscheiden, muss mit einem separaten Post-Hoc-Test ermittelt werden. Eine globale Nullhypothese mit paarweisen t-Test-Vergleich ist allerdings dann nicht zulässig, da sich der α -Fehler kumulieren würde. Die einzelnen Fehler α_i müssen vielmehr beispielsweise mit der in dieser Arbeit genutzten Bonferroni-Holm-Prozedur korrigiert werden.

Das zur einfaktoriellen Varianzanalyse gehörige mathematische Modell lautet:

$$X_{ij} = \mu_i + \epsilon_{ij} \quad i = 1, \dots, k \quad j = 1, \dots, n_i \quad (11.3)$$

mit X_{ij} als Zielvariable, k die Anzahl der Faktorstufen/Gruppen, n_i Stichprobenumfänge der Gruppen, $\mu_i = \mu + \alpha_i$ der Erwartungswert in der i -ten Gruppe als Summe von

arithmetischen Mittel der Gruppenerwartungswerte und dem Effekt der i -ten Faktorstufe α_i und schließlich ϵ_{ij} als Störvariablen, die unabhängig, normalverteilt, varianzgleich sind und den Erwartungswert Null besitzen. Die gesamte Varianz

$$SQT = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

(Sum of Squares Total) lässt sich dann in eine Summe $SQT = SQR + SQE$ von Streuungen in den Gruppen

$$SQR = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$$

(Sum of Squares Residuals) und Streuung zwischen den Gruppen

$$SQE = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2$$

(Sum of Squares Explained) schreiben. Der Quotient der beiden mittleren Quadratsummen $F = \frac{n-k}{k-1} \frac{SQR}{SQE}$ ist unter der Nullhypothese F-verteilt mit $\frac{k-1}{n-k}$ Freiheitsgraden (BORTZ und SCHUSTER, 2010, S.209).

11.3.2. Lineare Regression und Korrelation

Die lineare Regression ist ein Spezialfall der allgemeinen Regression, welche versucht, abhängige Variablen mit Hilfe einer oder mehrerer unabhängiger Prädiktor-Variablen zu beschreiben. Falls die Datenpunkte in der Form (y_i, x_i) für $i = 1, \dots, n$ vorliegen, so ergibt sich der einfache lineare Zusammenhang aus:

$$Y_i = \alpha + \beta x_i + \epsilon_i \quad (11.4)$$

Die x_i werden dabei als fixierte Messwerte, die y_i als Realisierungen der Zufallsvariablen Y_i mit einer gewissen Störgröße ϵ_i verstanden, Ziel ist die Bestimmung der unbekannten Parameter α und β . „Die Regressionsgerade ist diejenige Gerade, die die Summe der quadrierten Vorhersagefehler minimiert.“ (BORTZ und SCHUSTER, 2010, S.186)

Die einfache lineare Regression lässt sich auf mehrere feste Prädiktoren x_1, \dots, x_p mit je n Beobachtungen, der sogenannten Multiplen Regression, erweitern, so dass X nun eine Datenmatrix und die abhängige Variable Y , die Störterme ϵ und die Koeffizienten β Vektoren darstellen. Es ergibt sich das Gleichungssystem

$$Y_i = \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip} + \epsilon_i \quad (11.5)$$

oder kurz in Matrixform:

$$Y = X\beta + \epsilon \quad (11.6)$$

Die Regressionskoeffizienten werden mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt, d. h. die summierten Quadrate der Fehler (Residuen) werden minimiert. Die Lösung ist folgender Vektor als der erwartungstreue lineare Schätzer mit der geringsten Varianz:

$$b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{pmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (11.7)$$

Die lineare Regression zwischen unabhängiger und abhängiger Variable können zusätzlich durch weitere auch nominale Variablen wie Gruppenzugehörigkeit moderiert sein (BORTZ und SCHUSTER, 2010, S.357). Kategoriale Variablen dieser moderierten Regression werden in *R* automatisch mit Hilfe nominaler Dummy-Variablen kodiert (LUHMANN, 2013, S.258f). Für jedes lineare Modell müssen folgende Annahmen erfüllt sein¹⁵:

1. Die Datenmatrix X ist fest vorgegeben und besitzt einen um eins höheren Rang als die Anzahl der Regressionskoeffizienten.
2. Die abhängige Variable ist linear von allen Prädiktorvariablen abhängig.
3. Die Störgröße ϵ hat in allen Komponenten den Erwartungswert null und korreliert nicht mit der abhängigen Variablen (siehe Grafik 1 in der folgenden Regressionsdiagnostik Abschnitt 12.3, Abb. 12.10 als Beispiel).
4. Die Störgröße ist normalverteilt. $\epsilon_i \approx \mathcal{N}(0, \sigma^2)$. Dies lässt sich mit Hilfe eines Q-Q-Plots grafisch überprüfen (Grafik 2).
5. Die Störvariablen ϵ_i sind unkorreliert und besitzen die gleiche Varianz (Homoskedastizität). Meist wird die Varianzgleichheit grafisch mittels der Scale-Location überprüft, wobei sich die Wurzeln der standardisierten Fehler möglichst unsystematisch, zufällige, d.h. gleichmäßig über alle gefitteten (abhängigen) Werte verteilen sollten (Grafik 3). Ist dies nicht gegeben, so fehlen entweder wichtige Einflussgrößen, die unabhängigen Variablen interagieren miteinander oder es sind unterschiedliche Modelle für verschiedene Abschnitte der abhängigen Variable notwendig.
6. Einflussreiche Werte, sogenannte Hebelwerte (Leverage) dürfen nicht zu groß sein und vor allem dann keinen zu hohen Fehler besitzen. Die Hebelwerte oder Leverage kennzeichnen den Einfluss eines Wertes auf das lineare Modell und dessen Regressionskoeffizienten, kritisch sind Werte über 0,5 und vor allem große Hebelwerte, die zusätzlich noch einen großen standardisierten Fehler besitzen. Letztere schlagen sich auch in einem großen Wert der Cooks-Distanz nieder. Diese gibt für einen bestimmten Messwert an, um wie viel sich die Fehler aller anderen Fälle ändern, wenn dieser aus der Schätzung der Regressionsgleichung ausgeschlossen wird. Große Werte deuten

¹⁵ Siehe für umfassendere Darstellung LUHMANN (2013) und BORTZ und SCHUSTER (2010, S.192f)

auf Ausreißer oder ungewöhnliche Beobachtungen mit starkem Effekt auf das Modell hin. Werte mit einer Cooks-Distanz größer 1 müssen genauer analysiert werden. Als Faustregel für kritische Fälle gilt zusätzlich: $D > \frac{4}{n-k-1}$ mit n als Anzahl der Fälle und k als Anzahl der unabhängigen Variablen (Grafik 4)

7. Die Multikollinearität kennzeichnet die Stärke des Zusammenhangs zwischen den unabhängigen Variablen. Hohe Multikollinearitäten erhöhen den Standardfehler der Regressionskoeffizienten und erschweren die Bestimmung des eigentlichen Effekts einer unabhängigen Variable. Die bivariate Multikollinearität wird mit der Korrelationsmatrix der beiden unabhängigen Variablen überprüft. Koeffizienten über 0,8 gelten dabei als kritisch. Bei Prüfung der multivariaten Multikollinearität finden Toleranz und Varianzinflationsfaktor (VIF) Anwendung. Die Toleranz ist der Anteil der Variabilität eines Prädiktors, der unabhängig von den anderen Prädiktoren ist und berechnet sich $T_i = 1 - R_i^2$ mit R_i^2 als Determinationskoeffizienten der Regression des i-ten Prädiktors auf die anderen Prädiktoren bezeichnet (BORTZ und SCHUSTER, 2010, S.350). Werte unter 0,1 sind dabei als kritisch anzusehen.

Der Test dieser Modellannahmen auf Stimmigkeit wird Regressionsdiagnostik genannt. Bei multiplen Regressionen stellt sich die Frage, welche Prädiktoren für das lineare Modell in Frage relevant und einflussreich sind. Eine Möglichkeit stellt die Beurteilung der Anpassung mit Hilfe der Residualquadratsumme (RSS) dar. Die RSS stellt die Summe der Fehlerquadrate zwischen Datenpunkten und linearem Modell und damit ein Maß für die Passung dieses Modells zu den empirischen Daten dar.

$$RSS = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (11.8)$$

Eine weitere Möglichkeit der Beurteilung liefert das Bestimmtheitsmaß. Dieses, auch Determinationskoeffizient genannt, ist der Quotient aus erklärtem Anteil der Variabilität (Varianz) einer abhängigen Variablen zur Gesamtvariabilität durch ein statistisches Modell (siehe BORTZ und SCHUSTER, 2010, S.192). Bei der einfachen linearen Regression fällt es mit dem Quadrat des Korrelationskoeffizienten zusammen.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (11.9)$$

Das Maß hat den Nachteil, bei höherer Zahl von Prädiktoren größer zu werden, obwohl die zusätzlichen Variablen keinen wesentlichen weiteren Beitrag zur Erklärung liefern. Daher wird das korrigierte Bestimmtheitsmaß

$$\hat{R}^2 = R^2 - (1 - R^2) \frac{p}{n - p - 1} \quad (11.10)$$

mit Anzahl der Prädiktoren p und Stichprobengröße n verwendet, welches Erklärungskraft und Komplexität des Modells besser ausbalanciert. Es ist immer kleiner als das unkorrigierte

Maß.

Gibt es mehrere Regressionsmodelle, welche die Wirkung von unabhängigen auf die abhängige Variable erklären können, so kann das geeignete Modell danach ausgewählt werden,

1. dass es durch wenige Parameter eine möglichst einfache Erklärung liefert.
2. dass es ausreichend komplex ist, um die empirischen Daten gut zu erklären.

Dafür sind zwei Möglichkeiten denkbar:

Der Aufbau des Modells beginnt beim Nullmodell (Konstante) und schrittweise Hinzunahme von Prädiktorvariablen bis sich das (korrigierte) Bestimmtheitsmaß nicht mehr signifikant erhöht, zusätzliche Variablen also nicht mehr wesentlich zur erklärten Varianz beitragen. Die zweite Variante ist von einem Modell mit Maximalzahl theoretisch sinnvoller Variablen auszugehen und schrittweise Variablen auszuschließen, wenn dies das Fehlermaß RSS nicht signifikant erhöht (TOUTENBURG, 2000; HATZINGER et al., 2011, S.298ff). Die bei BORTZ und SCHUSTER (2010, S.358) Vorwärts- und Rückwärtstechnik genannten Algorithmen, wie auch die Maße können jeweils kombiniert werden. Für diese Arbeit soll das Rückwärtseinsetzen mit dem Fehlermaß RSS Anwendung finden, wobei aber auch das Bestimmtheitsmaß ausgewertet wird. Dadurch lassen sich beide Einflussgrößen, ein geringer Vorhersage-Fehler als auch eine große Erklärungsfähigkeit des Regressionsmodells gewährleisten.

Zusammenhang zur Korrelation

Zwischen der linearen Regression und der Korrelation besteht ein enger Zusammenhang. Der Korrelationskoeffizient $r_{xy} = \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_{xx}s_{yy}}}$, mit s_{xy} als empirische Kovarianz zwischen x und y sowie s_{xx} und s_{yy} als die beiden Varianzen von x und y , drückt aus, ob eine lineare Beziehung zwischen zwei Variablen x und y besteht. Sie gibt die Stärke und Richtung des Zusammenhanges an. Für die unterschiedlichen Skalenniveaus existieren verschiedene Zusammenhangsmaße, welche meist standardisiert verwendet werden, um eine Vergleichbarkeit bei unterschiedlichen Stichproben zu ermöglichen.

Für den zweidimensionalen Fall können die Datenpunkte in der x-y-Ebene durch zwei verschiedene Regressionsgeraden $y = g_x(x)$ mit dem Regressionskoeffizienten $b_x = \frac{s_{xy}}{s_{xx}}$, aber ebenfalls durch $x = g_y(y)$ mit $b_y = \frac{s_{xy}}{s_{yy}}$ beschrieben werden. Erst ein hoher Korrelationskoeffizient zwischen den Variablen x und y , also ein hoher linearer Zusammenhang rechtfertigt die Verwendung nur einer Regressionsgeraden. Für die einfache lineare Regression lässt sich daher schreiben:

$$b = r \frac{s_y}{s_x} \quad (11.11)$$

Um den Einfluss von Messeinheiten auf die Steigung b zu beseitigen, müssen x und y z-standardisiert werden, so dass sich eine Regressionsgleichung

$$\hat{z}_y = B \cdot z_x \quad (11.12)$$

ergibt mit B als standardisierter Steigung, auch Beta-Gewicht genannt. Nach Standardisierung von 11.11 zeigt sich, dass die standardisierte Steigung genau der Korrelation von x und y entspricht. Die Korrelation und damit das Beta-Gewicht drückt aus, um wie viele Standardeinheiten sich die abhängige Variable, bei Erhöhung der unabhängigen Variable um eine Standardabweichung ändert. Bei z-Standardisierung entfällt zusätzlich der Achsenabschnitt. Mit Hilfe eines t-Tests kann überprüft werden, ob sich der Korrelationskoeffizient signifikant von Null unterscheidet, also ein linearer Zusammenhang gewisser Stärke zwischen den beiden Variablen besteht. Zwischen den Variablen können Mediator- oder Moderatorvariablen sich auf den Zusammenhang auswirken, deren Effekte durch Herauspartialisieren dieser Störvariablen den Korrelationskoeffizienten auf den richtigen Wert korrigieren. Nach BORTZ und SCHUSTER (2010, S.340): „Die partielle Korrelation ist die bivariate Korrelation zweier Variablen, welche mittels linearer Regression vom Einfluss einer Drittvariablen bereinigt wurden.“

Für die multiple Regression gilt nach BORTZ und SCHUSTER (2010, S.346) analog: „In einer multiplen Regression mit k Prädiktoren gibt die Steigung b_j die erwartete Veränderung des Kriteriums y an, die einer Erhöhung des j -ten Prädiktors um eine Einheit entspricht, wenn die anderen $k-1$ Prädiktoren konstant sind.“ Bei der multiplen Regression gilt für die Regressionsgewichte:

$$b_j = sr_j \cdot \frac{s_y}{s_j^*} \quad (11.13)$$

mit sr_j semipartielle Korrelation zwischen y und x_j^* , dem j -ten, von allen anderen bereinigten Prädiktor und s_j^* die Standardabweichung des bereinigten Prädiktors - partielle Standardabweichung genannt. Die Standardisierung erfolgt im Vergleich zum einfachen Fall statt mit der gewöhnlichen Standardabweichung s_j mit der partiellen Standardabweichung s_j^* . Die semipartielle Korrelation sr_j stellt das relevante Maß für die Beurteilung der Wichtigkeit eines jeden Prädiktors - als standardisierter partieller Steigungskoeffizient - dar: „Die semipartielle Korrelation sr_j gibt die erwartete Veränderung des standardisierten Kriteriums an, die einer Erhöhung des j -ten Prädiktors (bei Kontrolle der anderen Prädiktoren) um eine partielle Standardabweichung – eine Standardabweichung der bedingten Verteilung – entspricht“ (BORTZ und SCHUSTER, 2010, S.357).

Die ursprünglichen Betagewichte sind mit den Toleranzen des Prädiktors und der Semipartialkorrelation über $sr_j = B_j \cdot T_j$ verbunden.

11.3.3. Analyse von Concept Maps

Neben der qualitativen Auswertung von Concept Maps lassen sich quantitative Untersuchungen in die Analyse von Strukturparametern der Maps und die Korrespondenzanalyse verschiedener Maps unterscheiden (STRACKE, 2004b; CAÑAS et al., 2013). Erstere umfassen neben der einfachen Anzahl von Konzepten und Präpositionen

- den *Umfang* als die Gesamtzahl der gesetzten Relationen und Maß für die Vernetzung der Begriffe
- die *Zerklüftetheit* als Anzahl nicht miteinander verknüpfter Teilmaps und Maß für die Integration der Wissensstruktur
- die *Zentralität* als Anzahl der Verbindungen von und zu einem Konzept und Maß für die Stellung des Konzepts im Vergleich zu anderen
- die *Verknüpfungsdichte* als Quotient von Umfang und maximal möglichen Umfang $U_{max} = n(n - 1)/2$
- und schließlich dem *Linkage* als durchschnittliche Anzahl der Propositionen pro Konzept.

Es existieren noch andere Parameter, wie die maximale Weglänge und der Statusindex von Hoede. Deren fachliche Einordnung gestaltet sich nach STRACKE (2004b) aber als schwierig und inkonsistent. Nach BONATO (1990) deckt sich die Einteilung mittels Strukturparametern mit der unabhängigen Benotung der Concept Maps und erlaubt eine Differenzierung zwischen Novizen und Experten.

Für die vorliegende Arbeit ist besonders der Vergleich zweier Concept Maps vor und nach einer zu evaluierenden Maßnahme interessant, um mögliche Änderungen durch diese zu erfassen.

Die Korrespondenzanalyse untersucht die Übereinstimmungen von Konzepten und Präpositionen im inter- wie intraindividuellen Vergleich¹⁶. Auch hier gibt es nach STRACKE (2004a) geeignete Parameter zur quantitativen Beschreibung, wie einfache und gewichtete Korrespondenzkoeffizienten. Diese vereinfachen den Vergleich einer großen Zahl von Concept Maps, liefern aber nicht die vielfältigen Informationen eines qualitativen Vergleichs. Für die vorliegende Arbeit wurden die Concept Maps der Seminarteilnehmer zu Beginn und Ende des Seminars verglichen, da ein Experten-Novizen-Vergleich nach STRACKE (2004b) eine Idealstruktur in Inhalt und Zusammenhängen voraussetzt, an welche sich die Lernerstruktur im Verlauf der Professionalisierung annähern könnte. Dies würde aber einen breiten Konsens zur Quantenphysik zur Erstellung eines Expertennetzes erfordern, die nur sehr schwierig zu realisieren ist, wie es auch die Anforderungsanalyse in Abschnitt 7.2.3 gezeigt hat.

¹⁶ zwischen verschiedenen Personen, wie eines Novizen als Test- und eines Experten als Referenznetz, bzw. einer Person zu verschiedenen Zeitpunkten

Zwischen Strukturanalyse und Korrespondenzanalyse lassen sich die u.a. von NOVAK (1984) vorgeschlagenen bewertende Verfahren einordnen, die sich aber durch die Überbetonung struktureller Aspekte gegenüber der Qualität der Verknüpfung und fehlender interner Konsistenz als nachteilig herausgestellt haben (LIU und HINCHEY, 1996).

Nach RUMELHART und NORMAN (1978) äußert sich Wissenserwerb durch einen Wissenszuwachs, einer Feinabstimmung und Umstrukturierung. Dies bedeutet für Wissensnetze nach PEUCKERT (1999) eine Vergrößerung, Verdichtung und Umstrukturierung, die sich nach STRACKE (2004b, S.27) in neuen Begriffen, neuen Relationen und höherer Verknüpfungsdichte bzw. in der Neuorganisation der Concept Maps zeigt und damit auch die Forschungshypothesen aus Kapitel 5 aufgreift. Die vorliegende Arbeit wird daher Veränderungen in den Concept Maps der Studenten in Versuchs- und Vergleichsgruppe strukturell-qualitativ auswerten, dazu werden wichtige und zentrale Begriffe herausgearbeitet und die durchschnittliche Veränderung in der Konzept- und Propositionszahl und deren Dichte analysiert.

In einer Vergleichsgruppe sollten hingegen die Concept Maps zeitlich stabil sein, d.h. die Anzahl der Konzepte, Relationen und die Zerklüftetheit ändern sich nur unwesentlich und der einfache und der gewichtete Korrespondenzkoeffizient sind annähernd konstant, wohingegen bei Lernern die Relationenzahl und -dichte sich erhöht (WALLACE und MINTZES, 1990). In einer neueren Untersuchung von STRACKE (2004b) steigt zwar die Relationenzahl sowohl in Experimental- und Kontrollgruppe, aber der Effekt ist in der Versuchsgruppe signifikant größer, die Experimentalgruppe zeigt mehr neue, die Kontrollgruppe hingegen mehr identische Relationen.

In der vorliegenden Arbeit wurden die von den Studenten schriftlich erstellten Concept Maps in den Computer übertragen und mit Hilfe der Programme *CMap Tools* und dessen Erweiterung *Cmap Analysis* (CAÑAS et al., 2013) analysiert.

12. Auswertung und Ergebnisse

Die Evaluation zur Wirksamkeit des Seminars beginnt mit der Darstellung der durch eine Clusteranalyse gewonnenen Kompetenztypen am Beginn des Seminars. Es folgt die Darstellung der Ergebnisse des fachlichen und fachdidaktischen Leistungstests sowohl in der Versuchs- als auch der Vergleichsgruppe am Beginn und am Ende des Semesters, in welchem das Seminar bzw. für die Vergleichsgruppe ein inhaltlich nicht verwandtes Seminar stattfand. Dabei sollen diese Testergebnisse auch mit den studentischen Selbsteinschätzungen aus der Anforderungsanalyse, Abschnitt 7.1.2 verglichen werden. Es schließt sich die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Wissen und der Einschätzung der Relevanz und Lehrbarkeit quantenmechanischer Begriffe an. Dann werden jeweils mit Hilfe eines linearen Modells die Prädiktoren für die Änderung des fachlichen und fachdidaktischen Wissens untersucht. Zum Schluss folgt die quantitative und qualitative Untersuchung der Concept Maps als alternative Repräsentation der Änderung des fachlichen Wissens.

12.1. Kompetenztypen und Ergebnisse des Seminars

Kompetenztypen

Welche Kompetenzunterschiede gibt es bei den Studenten nach dem Besuch der Theorievorlesungen in der Quantenphysik?

Die Studenten der Versuchs- sowie der Vergleichsgruppe wurden einem Leistungstest (Prätest) mit Fragen aus dem fachlichen und fachdidaktischen Bereich unterzogen. Die detaillierten Ergebnisse der Gruppen werden am Ende dieses Abschnittes vorgestellt. Für die Typisierung mittels Clusteranalyse wurde mit Hilfe einer Varianzanalyse kontrolliert, dass sich die Versuchsgruppen und die Vergleichsgruppe jeweils nicht signifikant im Anfangsniveau unterscheiden. Dann wurden Korrelationen der Testitems untereinander untersucht, da diese die Analyse bei zu hohen Korrelationskoeffizienten verfälschen könnten. Allerdings wurden keine signifikanten Korrelationen der Testitems untereinander gefunden. Für die Verbesserung der Clusterung durch das Ward-Verfahren wurde zunächst eine Vorclusterung mittels Single-Linkage vorgenommen, wobei die Items standardisiert wurden, um die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Skalen zu garantieren.

Zur Optimierung der Clusteranalyse wurden die Objekte mit den ID 20, 16, 18 und 10 im

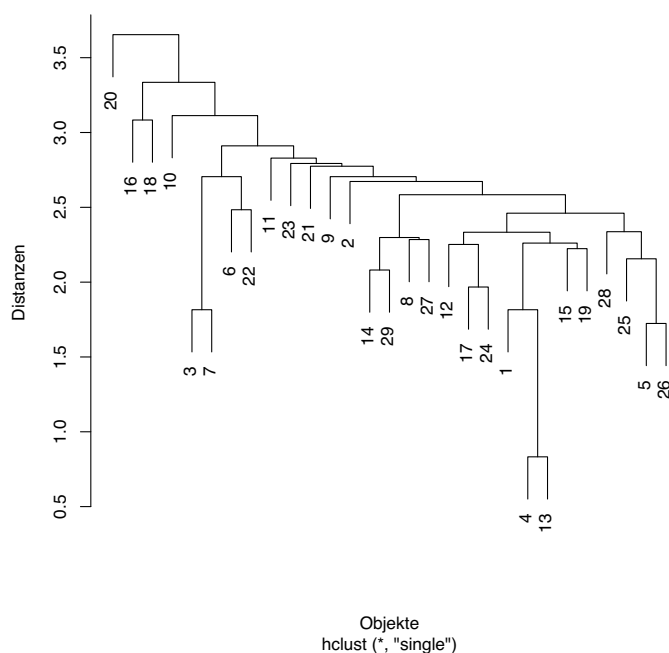


Abbildung 12.1.: Kompetenztypen - Dendrogramm der Clusteranalyse im Single-Linkage-Verfahren

Single-Linkage-Verfahren (siehe Abb. 12.1) entfernt, da sie zu allen anderen Gruppen eine zu große Distanz besitzen und sich daher keiner der Gruppen gut zuordnen lassen.

Tabelle 12.1.: Die vier Gruppen der Clusteranalyse der Kompetenzen

	Maximalwerte	Gesamtmittelwerte	Mittelwerte 1	Mittelwerte 2	Mittelwerte 3	Mittelwerte 4
Erk. Interferenzexp.	2.00	1.54	1.88	1.23	2.00	1.75
Fkt. Interferenzexp.	2.00	1.22	1.75	1.31	0.25	1.38
Fachwissen 2	3.00	1.40	2.00	1.15	1.25	1.75
Schülvorstellungen	7.00	4.02	5.62	4.12	2.25	3.88
Fachwissen 3	4.00	2.64	3.00	2.15	2.50	4.00
Bohr	2.00	0.88	1.75	0.85	0.75	0.25
Definitionen	3.00	1.56	1.50	1.55	0.50	1.88

In der Literatur finden sich zwei verschiedene Algorithmen zur Umsetzung der Ward-Clusterung. Der hier genutzte Algorithmus ward.d2 nutzt das von WARD (1963) genutzte Clusterkriterium, wobei Distanzen vor der Clusterung quadriert werden. In der Auswertung der Analyse mit einer guten Agglomeration von $\alpha = 0.72$ zeigen sich in den Leistungen vier Gruppen. Das zugehörige Dendrogramm ist in Abbildung 12.2, die zugehörigen Gruppen mit den Testwerten in Tabelle 12.1 zu sehen. Dies wurden durch eine Varianzanalyse mit anschließendem multiplen Paarvergleich validiert¹.

¹ Diese Analysen befinden sich im Anhang 20 auf Seite 233.

Tabelle 12.2.: Vergleich der Gruppen mit Gruppengröße hinsichtlich der Kompetenzen

Zusatzinhalte	Leistungsstarke (16%)	Fachdidaktik-Orientierte (52%)	Leistungsschwache (16%)	Theorieorientierte (16%)
Erk. Interferenzexp.	↑	↓	↑	↑
Fkt. Interferenzexp.	↑	↑	↓	↑
Fachwissen ²	↑	↑	↓	↓
Schülervorstellungen	↑	↑	↓	↓
Fachwissen ³	↑	↓	↓	↑
Bohr	↑	↑	↓	↓
Definitionen	↑	↑	↓	↑

↓ geringe Ausprägung

↑ hohe Ausprägung

→ durchschnittlich

² Fachfragen zu Welle- & Teilcheneigenschaften und zum Bahnbegriff³ Fachfragen zum Eigenschaftsbegriff und zum Determinismus

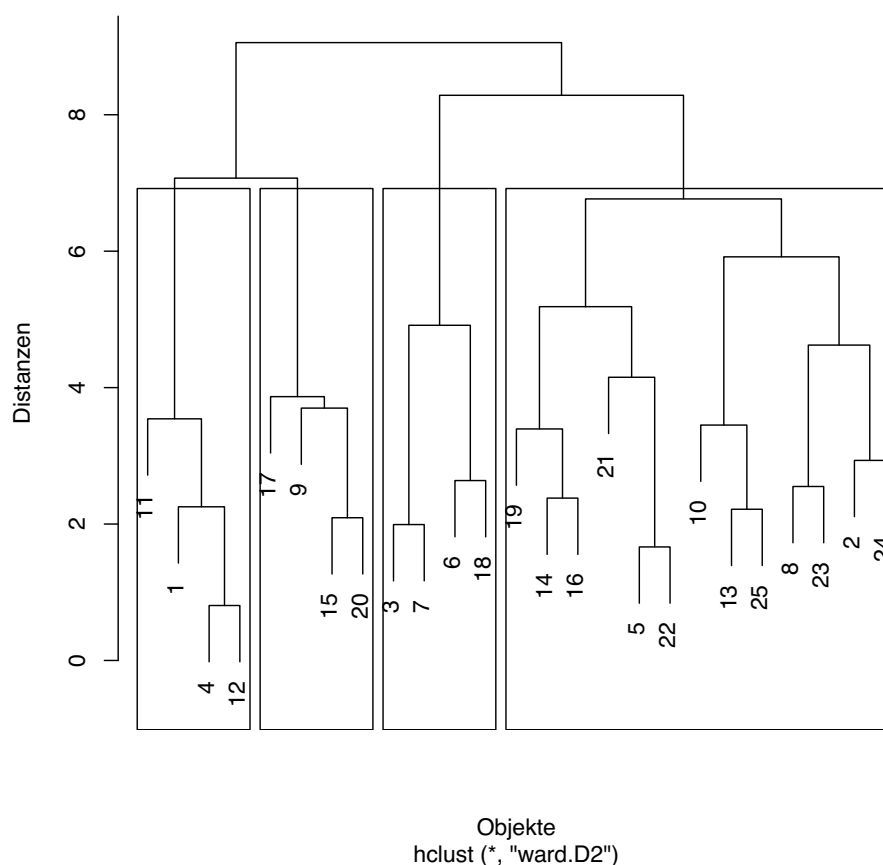


Abbildung 12.2.: Kompetenztypen - Dendrogramm der Clusteranalyse im Ward-Verfahren (Berücksichtigung des Ward-Kriteriums) mit Gruppenzuordnung

Leistungsstarke Die erste, recht kleine Gruppe der Leistungsstarken in Tabelle 12.2 zeigt sich überdurchschnittlich sowohl im fachlichen wie im fachdidaktischen Wissen, nur bei den Definitionen ist das Fachwissen „nur“ durchschnittlich. Diese Gruppe benötigt eine zusätzliche fachdidaktische Ausbildung eher nicht.

Leistungsschwache Die dritte, gleich große Gruppe ist dazu im krassen Gegensatz leistungsschwach in fast allen Bereichen, außer bei den Erkenntnissen, die aus einem Analogexperiment zur Interferenz gewonnen werden können. Bei ihr zeigen sich so starke fachliche Defizite, dass ein zusätzliches einsemestriges, auf fachdidaktische Themen fokussiertes Seminar diese kaum ausgleichen kann.

Fachdidaktik-Orientierte Die mit über der Hälfte der Teilnehmer sehr große zweite Gruppe der Fachdidaktik-Orientierten ist fachlich eher schwach bis durchschnittlich, im fachdidaktischen Bereich ebenfalls durchschnittlich. Sie könnte von einer ergänzenden

Tabelle 12.3.: Unterschiede in den Gruppen hinsichtlich der Kompetenzen

Kompetenzen	ANOVA	zugehöriger Post-Hoc-Test
Erk. Interferenzexp.	***	1-2**, 2-3***, 2-4*
Fkt. Interferenzexp.	*	1-3*,
Fachwissen 2	*	1-2*
Schülervorstellungen	**	1-3**
Fachwissen 3	**	2-4***, 3-4*
Bohr	**	1-4**
Definitionen	-	-

* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$ *** $p < 0.001$

fachdidaktischen Ausbildung, die neben der Analyse von Schülervorstellungen die Planung von Unterricht enthält und außerdem Wert auf Erklärung der Konzepte legt, stark profitieren.

Theorieorientierte Noch aussichtsreicher ist die vierte und letzte Gruppe der Theorieorientierten, dies sind leistungsstarke Studenten, die allerdings Schwächen beim Erkennen und adäquatem Reagieren auf Schülerfehlvorstellungen und bei der Konzeption des Übergangs vom halbklassischen Bohrschen zu einem differenzierten quantenmechanischen Atommodell haben. Die fachdidaktische Behandlung dieser Themen könnte ihre Leistung im Fachdidaktiktest steigern.

Die Gruppeneinteilung deckt sich weitestgehend mit der Untersuchung von GRAMZOW et al. (2011) in Abbildung 12.3, in der ein fachenthusiastisches, ein schulpraktisch orientiertes und ein leistungsschwaches Profil identifiziert werden konnte. Dort werden Anknüpfungspunkte für die mögliche Verbesserung der Ausbildung in Form individuell unterstützender Lernmodule gesehen.

	(1) Fachenthusiast	(2) Schulpraktisch orientiertes Profil	(3) Leistungsschwaches Profil
Wissensbereiche	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr gute Leistungen in der Fachwissenschaft, in der Fachdidaktik und in der Pädagogik 	<ul style="list-style-type: none"> • Schlechte Leistungen in der Fachwissenschaft • Durchschnittliche Leistungen in der Fachdidaktik • Gute Leistungen in der Pädagogik 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr schlechte Leistungen in der Fachwissenschaft, in der Fachdidaktik und in der Pädagogik
Demographische Angaben	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr niedriger Frauenanteil • Gute Abiturnote • Hohe SWS-Anzahl im Fach • Vor allem im GyGe-Studiengang, selten im HR-Studiengang der Universität • Sehr häufig Physik als Prüfungsfach im Abitur 	<ul style="list-style-type: none"> • Überdurchschnittlich hoher Frauenanteil • In allen Studiengängen etwa gleich häufig vertreten • Viele Praxisphasen • Überdurchschnittlich selten Physik in der Oberstufe • Große Gruppe 	<ul style="list-style-type: none"> • Eher schlechte Abiturnote • Niedrige SWS-Anzahl im Fach • Etwas häufiger im HR-Studiengang der Universität • Eher wenig Praxisphasen
Beliefs	<ul style="list-style-type: none"> • Angemessene Vorstellungen zu physikalischen Erkenntnissen • Weniger starke Neigung zum naiven Empirismus • Ablehnung des rezeptartigen Lernens 	<ul style="list-style-type: none"> • Neigt zum naiven Empirismus 	<ul style="list-style-type: none"> • Weniger angemessene Vorstellungen zu physikalischen Erkenntnissen • Bevorzugung des rezeptartigen Lernens
Motivationale Orientierungen	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Fachenthusiasmus • Hohe Selbstwirksamkeitserwartung bzgl. des Physik-Lehrens 	<ul style="list-style-type: none"> • Niedrige Selbstwirksamkeitserwartung bzgl. des Physik-Lehrens 	<ul style="list-style-type: none"> • Niedrige Selbstwirksamkeitserwartung bzgl. des Physik-Lehrens

Abbildung 12.3.: Kompetenzprofile nach GRAMZOW et al. (2011, S.18)

Ergebnisse Kompetenztest

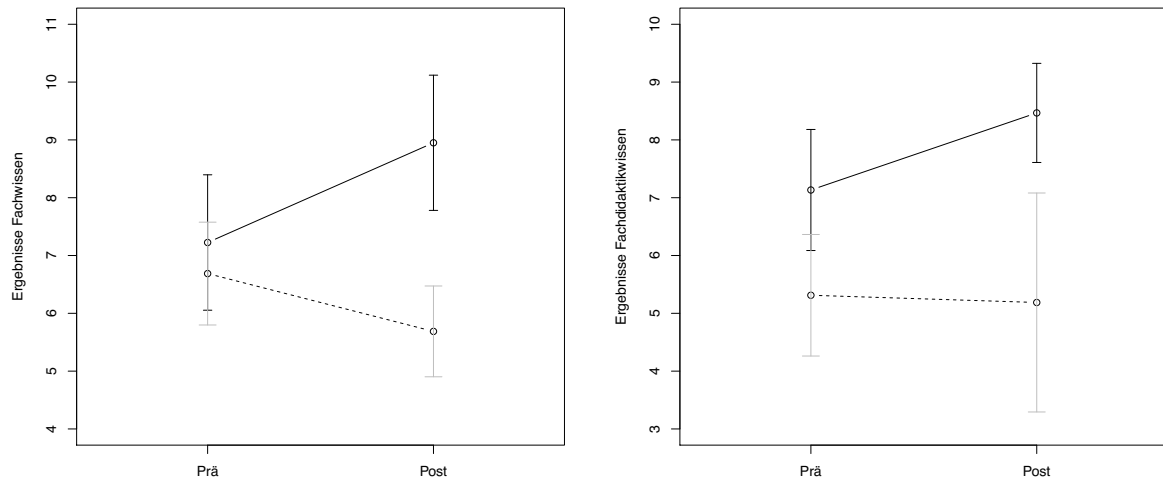


Abbildung 12.4.: Entwicklung des durchschnittlichen Fachwissens (links) und Fachdidaktikwissen (rechts) in Versuchs- und Vergleichsgruppe (gestrichelt)

Die Ergebnisse der beiden Wissenstests der Versuchs- und der Vergleichsgruppe jeweils vor und nach dem Semester sehen Sie in Tabelle 12.4 zusammengefasst und aufgeteilt in die beiden Kompetenzbereiche in der Abbildung 12.4 dargestellt.

Die Tabelle 12.5 zeigt, dass sich Versuchs- und Vergleichsgruppe im Fachwissen nach dem Besuch der Theorievorlesungen nicht signifikant voneinander unterscheiden. Dies ändert sich drastisch nach den Seminaren, die Gruppen sind nun hochsignifikant voneinander verschieden. Die Unterschiede vor und nach dem Seminar mit verschiedenen Vergleichen sind für die beiden Gruppen in Tabelle 12.6 zu sehen. In der Versuchsgruppe sind die Testergebnisse nach dem Besuch der fachdidaktischen Zusatzseminars signifikant besser mit einer hohen Effektstärke von 0.88. Ein gegensätzliches Bild zeigt sich in der Vergleichsgruppe, die Testergebnisse im Nachtest zeigen ein signifikant schlechteres Fachwissen mit ebenfalls hoher Effektstärke von 0.94. Beide Tests besitzen jeweils eine gute Teststärke, die in der letzten Spalte der Tabelle zu finden ist.

Wie zeigen sich die Unterschiede im Detail? Am Anfang zeigt sich in beiden Gruppen, dass Interferenzexperimente von den Testpersonen nur hinsichtlich ihrer Welleneigenschaften analysiert werden und deren didaktische Funktionen oft nicht bekannt sind. Im Allgemeinen werden Fachfragen, außer zur Verschränkung, von vielen bereits am Anfang des Seminars richtig beantwortet, fachdidaktische Fragen fallen dagegen zurück. So sind den angehenden Lehrern ein mögliches Vorgehen beim Konzeptwechsel im Allgemeinen und speziell zwischen Bohrschen Atommodell und einem adäquaten quantenmechanischen Or-

bitalmodell häufig nur rudimentär oder gar nicht bekannt. Auffällig ist bei der Betrachtung des Post-Tests, dass die Qualität der Antworten zu fachdidaktischen Fragestellungen in der Versuchsgruppe auffällig ansteigt, in der Vergleichsgruppe hingegen stagniert.

Im nächsten Abschnitt werden die Relevanz und Lehrbarkeit aus Sicht der Studenten untersucht. Dafür ist es interessant, einen speziellen Teil des Fachwissens, die Definitionen dieser Begriffe, in Abbildung 12.5 genauer zu betrachten. Teilnehmer sowohl aus der Versuchs- als auch der Vergleichsgruppe wurden gebeten, Definitionen für die Begriffe Unbestimmtheit, Dualismus und Verschränkung zu geben. In der Abbildung 12.5 sehen Sie den Prozentsatz der richtig gegebenen Antworten im Anfangsniveau über beide Gruppen.

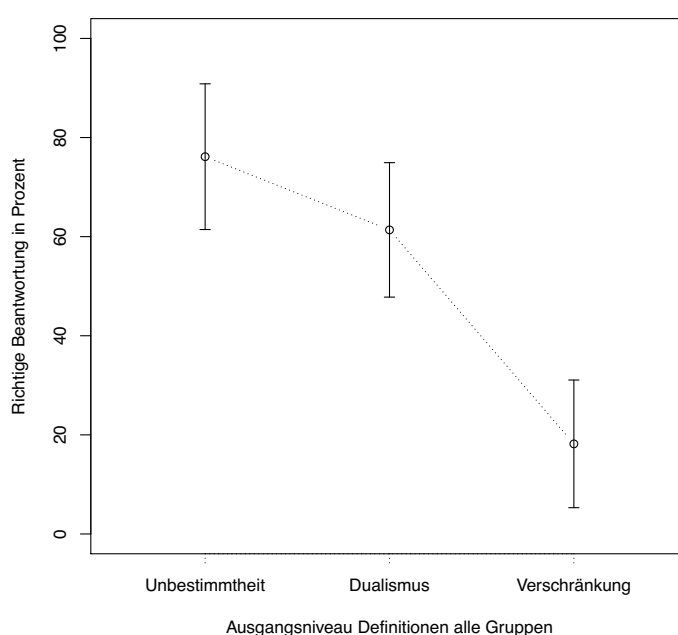


Abbildung 12.5.: Definitionswissen der Studenten nach der Theorieausbildung

Tabelle 12.4.: Ergebnisse der Professionswissenstest in Versuchs- & Vergleichsgruppe (Standardabweichung in Klammern)

	Präbefragung	Postbefragung
Versuchsgruppe		
Fachwissen	7.15 (1.88)	8.95 (1.77)
Fachdidaktisches Wissen	6.39 (2.55)	8.47 (1.79)
Kontrollgruppe		
Fachwissen	6.5 (1.75)	5.67 (1.56)
Fachdidaktisches Wissen	5.25 (1.27)	5.39 (2.33)

Tabelle 12.5.: Vergleich der Versuchs- und Experimental-Gruppen im Prä- und im Post-Test des Professionswissens

	Gruppenunterschiede
Fachwissen Prä	n.s.
Fachwissen Post	**
Fachdidaktikwissen Prä	n.s. ⁴
Fachdidaktikwissen Post	***

Es fällt auf, dass die Begriffe Unbestimmtheit und Dualismus mit ähnlichen Prozentsätzen an richtigen Antworten von 76.14 % und 61.36 % deutlich häufiger richtig definiert wurden als Verschränkung mit 18.18 %. Was dieser quantenmechanische Begriff bedeutet, war den Studenten nach der Theorievorlesung hochsignifikant seltener bekannt⁵.

Beim Fachdidaktikwissen unterscheiden sich Vergleichs- und Versuchsgruppe am Anfang ebenfalls nicht signifikant voneinander, am Ende jedoch sogar höchstsignifikant. Die Versuchsgruppe zeigt eine positive, signifikante Veränderung mit mittlerer Effektstärke von 0.66, bei hoher Teststärke von 0.87. In der Vergleichsgruppe können keine signifikanten Veränderungen festgestellt werden.

Tabelle 12.6.: Vergleich der Ergebnisse des Prä- und Posttests Professionswissen

	Prä/Post	Post > Prä	Post < Prä	Effektstärke	Teststärke
Fachwissen Versuch	*	*	n.s.	0.88	0.98
Fachwissen Vergleich	*	n.s.	*	0.94	0.89
Fachdid. Wissen Versuch	*	*	n.s.	0.66	0.87
Fachdid. Wissen Vergleich	n.s.	n.s.	n.s.	-	-

⁴ Test mit exaktem Wilcoxon-Rangsummentest

⁵ Test mit Hilfe des exakten Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummen-Test

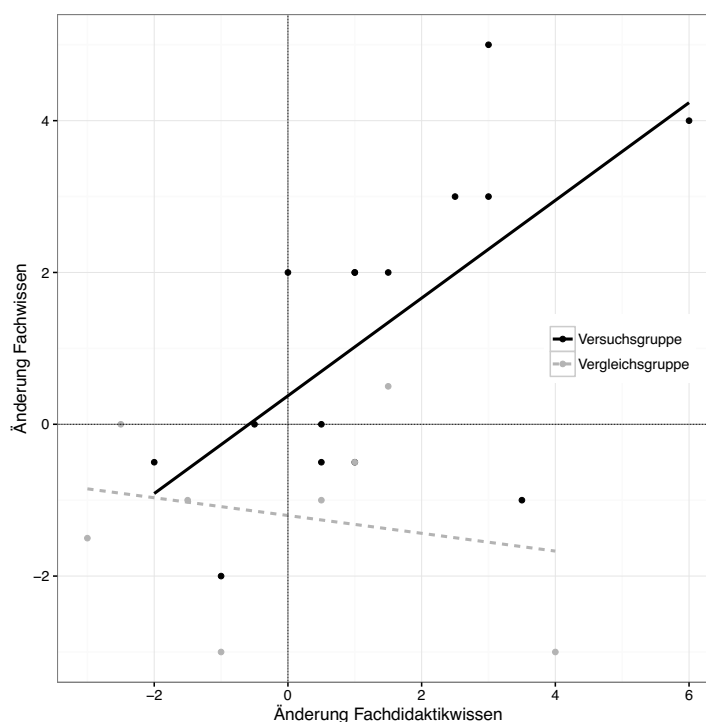


Abbildung 12.6.: Zusammenhang zwischen der Änderung des fachlichen Wissens und des fachdidaktischen Wissens in Versuchsgruppe und der Vergleichsgruppe.

Tabelle 12.7.: Zusammenhang zwischen der Veränderung des fachlichen und fachdidaktischen Wissens in der Versuchsgruppe

	1	2	3
1 Ausgangsniveau Fachwissen			
2 Ausgangsniveau fachdidaktisches Wissen	0.49 [*]		
3 Änderung Fachwissen	-0.53 [*]	-0.24	
4 Änderung fachdidaktisches Wissen	-0.65 ^{**}	-0.64 [*]	0.64 [*]

. p<0.1 * p<0.05 ** p<0.01 *** p<0.001

Die Veränderung des Fachdidaktikwissens in der Versuchsgruppe korreliert hoch signifikant mit $r = 0.77$ mit der des Fachwissens, aber nicht in der Vergleichsgruppe. Dies verdeutlicht auch die Abbildung 12.6, sie beruht auf einem linearen Modell zwischen den Änderungen in den beiden Professionswissensarten mit der Gruppenzugehörigkeit als Moderatorvariable. Das Lernen von fachlichem Wissen ist oft mit dem Lernen fachdidaktischen Wissens verbunden, obwohl es sich um getrennte Kompetenzbereiche handelt.

In Tabelle 12.7⁶ sind die Abhängigkeiten der Veränderungen in beiden Professionswissensarten von ihrem Ausgangsniveau dargestellt. Studenten mit geringem fach- und fachdidaktischem Ausgangsniveau zeigen große Zuwächse im fachdidaktischen Wissen, da

⁶ Die Regressionsanalyse befindet sich im Anhang Kapitel 26 auf Seite 251 geklärt.

dessen Änderung signifikant, stark negativ mit den beiden Ausgangsniveaus korreliert (letzte Zeile). Das ist insbesondere für die Gruppe 2 der vorhergehende Typisierung interessant, da sie trotz durchschnittlichem, bzw. teilweise leicht unterdurchschnittlichem Ausgangsniveau hohe Zuwächse im fachdidaktischen Wissen erzielen können. Eine ähnliche Tendenz zeigt sich bei der Veränderung des Fachwissens (dritte Zeile) im Bezug auf dessen Anfangsniveau. Eine starke Abhängigkeit vom Ausgangsniveau des Fachdidaktikwissens ist nicht festzustellen.

12.2. Relevanz und Lehrbarkeit quantenmechanischer Begriffe

Zusätzlich zum Leistungstest wurden die Studenten um die Einschätzung der Relevanz und Lehrbarkeit der quantenphysikalischen Begriffe Unbestimmtheit, Dualismus und Verschränkung für die Schule gebeten. Die Einschätzung der Relevanz der Begriffe⁷ nach der Theorievorlesung sehen Sie in Abbildung 12.7 links und die Veränderung auf der rechten Seite.

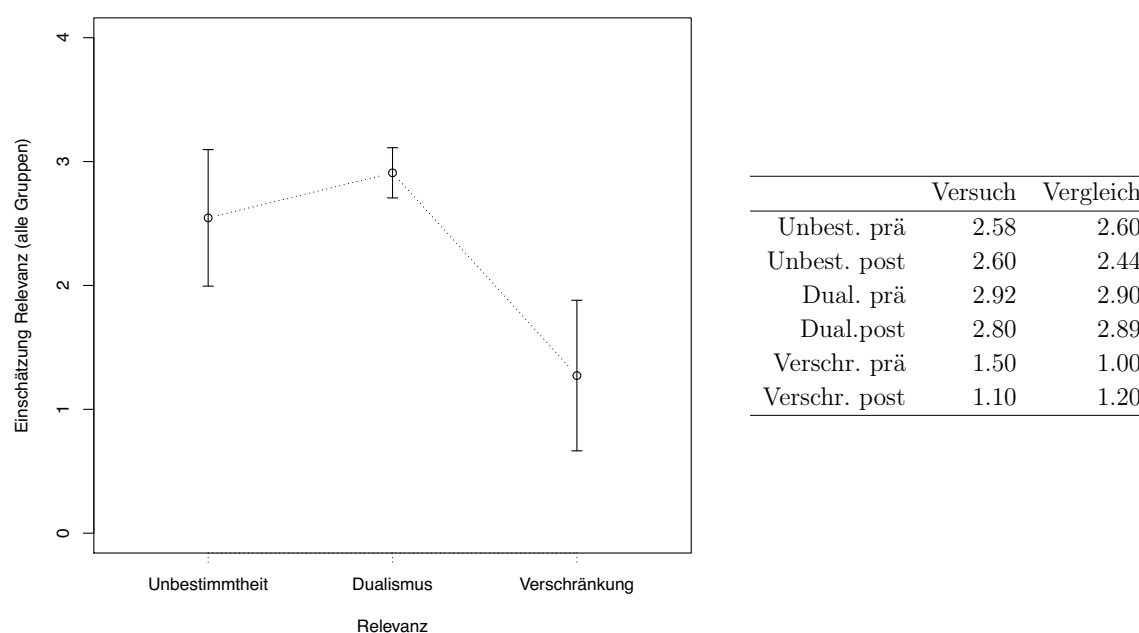


Abbildung 12.7.: Einschätzung der Relevanz

Die Begriffe Unbestimmtheit und Dualismus werden als relevant für den Schulunterricht angesehen, die Verschränkung hingegen nur wenig oder nicht. Diese Einstellung entsteht womöglich dadurch, dass die Verschränkung in den Theorievorlesungen auf Grund der knappen Zeit nicht oder nur sehr wenig behandelt wird. Bei der Betrachtung der einzelnen Antworten zur Verschränkung lässt sich aber feststellen, dass es sowohl eine Gruppe gibt, die diese als relevant und eine, die sie als nicht relevant einschätzt. Die ersten beiden Begriffe korrelieren auf mittlerem Niveau signifikant und unterscheiden sich jeweils höchstsignifikant vom Begriff der Verschränkung. Es sind sowohl in der Versuchs- als auch in der Vergleichsgruppe keine signifikanten Veränderungen in der Einschätzung der Relevanz festzustellen.

⁷ Die Stufen von 1 bis 4 sind charakterisiert als 1...4: nicht, wenig, etwas, sehr relevant

Bei der Einschätzung der Lehrbarkeit in 12.8 zeigt sich ein anderes Bild in der Einschätzung⁸ (linke Seite).

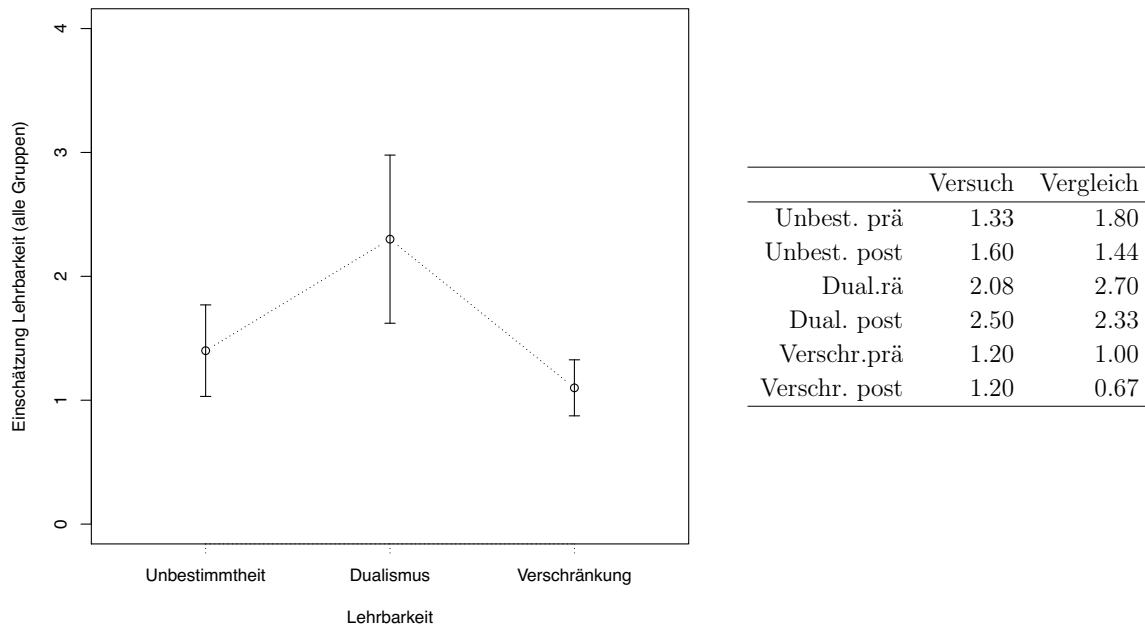


Abbildung 12.8.: Einschätzung der Lehrbarkeit

Der Dualismus ist nach Einschätzung der Studenten durchschnittlich bis gut lehrbar, die Unbestimmtheit teilweise schwierig, teilweise durchschnittlich und die Verschränkung wird von einem großen Teil als schwierig lehrbar angesehen. Durch Mittelwertsvergleiche lässt sich zeigen, dass die Einschätzung der Unbestimmtheit sich sowohl vom Dualismus als auch von der Verschränkung auf geringerem Niveau signifikant unterscheidet. Die beiden letzteren, Dualismus und die Verschränkung, sind in der Einschätzung höchstsignifikant voneinander verschieden.

Die Verschränkung zeigt sich damit sowohl in der Relevanz als auch der Lehrbarkeit als Sonderfall, zumal nur bei ihr die Relevanz und Lehrbarkeit signifikant stark miteinander korrelieren: Nur Lehramtsstudenten, die den Begriff als relevant einschätzen sehen auch die Möglichkeit die Verschränkung in der Schule zu lehren.

Bei der Änderung zeigt sich eine positive Tendenz in der Wirkung des fachdidaktischen Zusatzseminars zur Quantenphysik: Die Unbestimmtheit werden als lehrbarer empfunden oder die Lehrbarkeit, wie bei der Verschränkung, bleibt zumindest auf einem gleichen Niveau, wohingegen sie in der Vergleichsgruppe bei den beiden Begriffen sinkt. Der Effekt ist aber gering und die Änderungen daher nicht signifikant. Für den Begriff des Dualismus ist diese Tendenz aber ungünstig, da dieser von den Experten als unnötiges Konzept

⁸ Die Stufen von 1 bis 4 sind charakterisiert als 1...4: nicht, schwierig, durchschnittlich, gut lehrbar

und für das Verständnis der Quantenphysik als problematisch angesehen wird. Obwohl der Dualismus als Konzept in der Versuchsgruppe vermieden wurde, erscheint er für die Studenten noch besser lehrbar, wenn auch etwas weniger relevant.

12.3. Regressionsanalyse für die Änderung des fachlichen Wissens

Was sind die entscheidenden Faktoren für die Änderung des fachlichen Wissens?

Ist dieses bereits durch die Ausgangsniveaus des fachlichen und fachdidaktischen Kompetenzen der Lehramtsstudenten vorherbestimmt oder kann die zusätzliche themenspezifische fachdidaktische Ausbildung den entscheidenden Beitrag leisten? Oder gibt es Wechselwirkungseffekte zwischen diesen Faktoren, so dass sich diese gegenseitig beeinflussen?

Modellauswahl

All diese Fragen lassen sich mit Hilfe eines multiplen linearen Modells beantworten, das sowohl kategoriale als auch metrische Variablen enthält. Die Variablen können dabei, wie in Abschnitt 11.3.2 erläutert, vom Nullmodell (einer Konstante) ausgehend nacheinander aufgenommen werden bis keine signifikante Erhöhung der erklärten Varianz mehr auftritt. In der zweiten Möglichkeit wird von einem plausiblen Maximalmodell an Variablen ausgehend deren Zahl stückweise reduziert bis sich die Fehlerquadratsumme der Regression signifikant erhöht. Da die überschaubare Zahl an möglichen Variablen bekannt ist, wird in dieser Arbeit von der zweiten Option Gebrauch gemacht. Die Auswahl an Modellen sehen Sie in Tabelle 12.8, die Faktoren mit +-Zeichen sind dabei ohne, solche mit dem *-Zeichen mit Wechselwirkungseffekten verbunden, *Fach* bzw. *Fachdid* stehen dabei für das Anfangsniveau im Fach- bzw. Fachdidaktikwissen der Lehramtsstudenten und *Vergleich* als kategoriale Variable mit der Kodierung 1 für Teilnehmer der Vergleichsgruppe und mit 0 für Teilnehmer in der Versuchsgruppe.

Tabelle 12.8.: Lineare Modelle für die Änderung des Fachwissens im Seminar

Modellname	Lineares Modell
Maximalmodell	$\sim \text{Fach} * \text{Fachdid} * \text{Vergleichsgruppe}$
Reduziertes Modell 1a	$\sim (\text{Fach} + \text{Fachdid}) * \text{Vergleichsgruppe}$
Reduziertes Modell 1b	$\sim \text{Fach} * \text{Fachdid} + \text{Vergleichsgruppe}$
Reduziertes Modell 2	$\sim \text{Fach} + \text{Fachdid} + \text{Vergleichsgruppe}$
Reduziertes Modell 3	$\sim \text{Fach} + \text{Vergleichsgruppe}$
Reduziertes Modell 4a	$\sim \text{Fach}$
Reduziertes Modell 4b	$\sim \text{Vergleichsgruppe}$
Nullmodell	~ 1

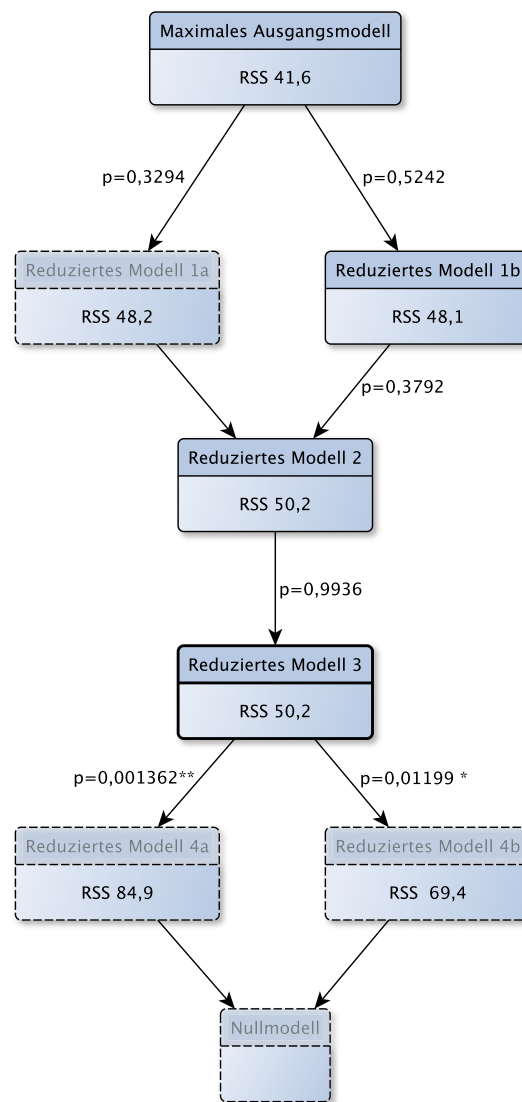


Abbildung 12.9.: Auswahl eines geeigneten linearen Modells für die Entwicklung des Fachwissens im Seminar

In der Abbildung 12.9 sehen Sie den Auswahlprozess über die Parameter aus Tabelle 12.9. Das maximale Ausgangsmodell zeigt dabei keine signifikanten Wechselwirkungs-Effekte, so dass eine Vereinfachung über einen F-Test geprüft⁹ wurde. Es gibt dabei zwei Möglichkeiten für die Reduktion der Wechselwirkung, einmal auf die Wechselwirkung der Kompetenzen mit der Mitgliedschaft in der Vergleichs- oder Versuchsgruppe (1a) bzw. die Wechselwirkung der Kompetenzen untereinander (1b). Aus inhaltlicher Sicht ist das letztere Modell zu bevorzugen, außerdem erklärt es mehr an Varianz und bietet höhere Signifikanzniveaus.

⁹ Die Ergebnisse der vereinfachenden F-Tests finden Sie im Anhangskapitel 27 auf Seite 253.

Tabelle 12.9.: Vergleich der linearen Modelle für die Änderung des Fachwissens im Zusatzseminar

	Maximalmodell	Red. Modell 1a	Red. Modell 1b	Red. Modell 2	Red. Modell 3	Red. Modell 4a	Red. Modell 4b
Konstante	1.03 (0.55)	1.32* (0.50)	1.16* (0.50)	1.32* (0.47)	1.32** (0.41)	0.42 (0.42)	1.23* (0.47)
Ausgangsniveau Fachwissen	-1.00* (0.41)	-0.83* (0.39)	-0.66* (0.26)	-0.66* (0.25)	-0.66* (0.24)	-0.58 (0.30)	
Ausgangsniveau Fachdidaktikwissen	0.05 (0.24)	0.02 (0.24)	-0.02 (0.19)	-0.00 (0.19)			
in Vergleichsgruppe	-1.65 (0.99)	-2.39* (0.86)	-2.38** (0.82)	-2.59** (0.79)	-2.59** (0.70)		-2.42** (0.80)
WW Fach:Fachdid	0.19 (0.16)		0.12 (0.14)				
WW Fach:Vergleich	1.23 (0.85)	0.43 (0.56)					
WW Fachdid:Vergleich	0.22 (0.55)	0.22 (0.55)					
WW Fach:Fachdid:Vergleich	0.50 (0.71)						
R ²	0.58	0.52	0.52	0.50	0.50	0.15	0.31
Adj. R ²	0.39	0.38	0.41	0.42	0.45	0.11	0.27

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, $p < 0.1$ WW: Wechselswirkung zwischen den Faktoren R^2 : unajustierter und adjustierter Determinationskoeffizient der erklärten Varianz

Allerdings zeigt sich auch bei diesem keine signifikante Wechselwirkung, so dass sich das Modell zunächst auf Variante 2 reduzieren lässt und da in diesem kein Einfluss des fachdidaktischen Ausgangsniveaus deutlich wird, weiter auf das gewählte Modell 3. Weitere Reduktion sind nicht anzuraten, da sich die Fehlerquadratsummen hochsignifikant bzw. signifikant erhöhen (Abb. 12.9) und sich die erklärten Varianzen in den weiteren Modellen (Tab. 12.9) 4a und 4b dramatisch verringern würde.

Regressionsdiagnostik

Die Regressionsdiagnostik für das gewählte Modell 3 ist in Abbildung 12.10 dargestellt.

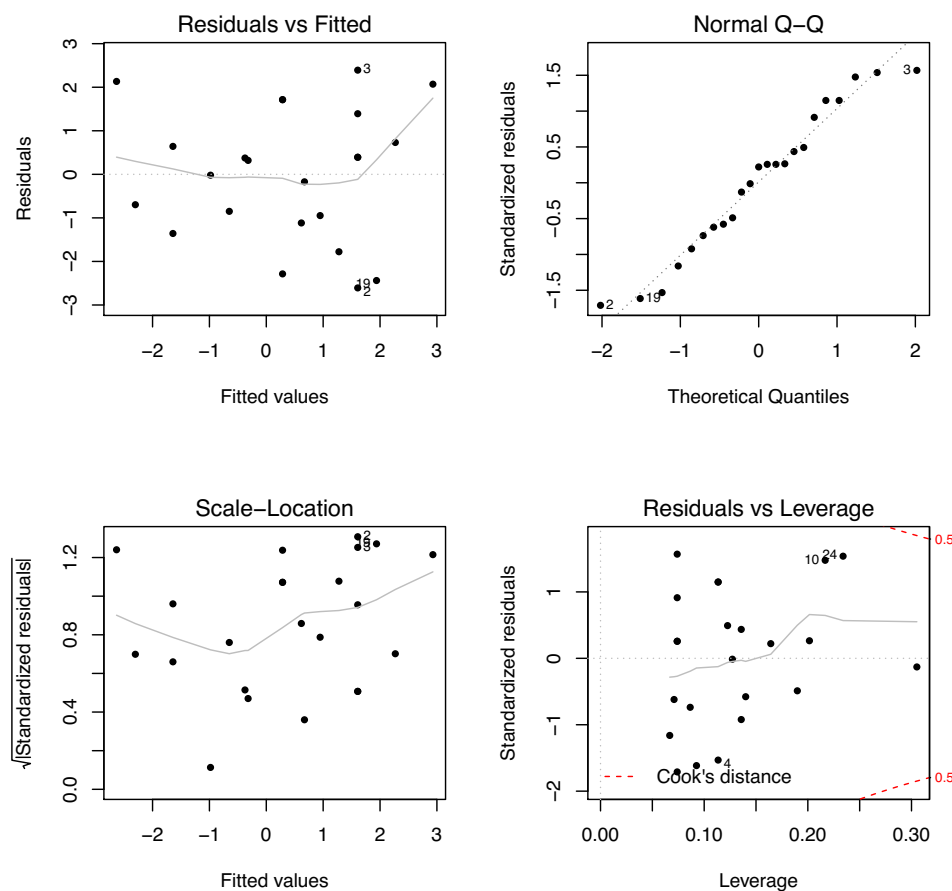


Abbildung 12.10.: Residuenplots des moderierten Regressionsmodells Fachwissen von links oben nach rechts unten:

1. Korrekte Modellspezifikation
2. Normalverteilung der Residuen
3. Homoskedastizität
4. Ausreißer

Die Teilgrafik 1 zeigt einen geringen Zusammenhang von Störgröße und abhängiger Variable,

auch die Lowess-Fitkurve¹⁰ verläuft, bis auf wenige Werte, parallel zur x-Achse. In der zweiten Grafik rechts oben ist die nahezu perfekte Normalverteilung der Störgröße zu sehen. Die Wurzeln der standardisierten Fehler in Grafik 3 links unten verteilen sich unsystematisch und gleichmäßig über alle gefitteten Werte, so dass von Homoskedastizität auszugehen ist. Die Hebelwerte in Grafik 4 zeigen sich unkritisch mit Werten für die Cooks-Distanz deutlich unter 0,5, auch noch für die erhöhten Hebel-Werte mit der ID 10 und 24.

Die Toleranzwerte als Maß für die Multikollinearität betragen für beide Prädiktoren jeweils 0.99. Dies weist auf eine sehr geringe Redundanz der Prädiktoren hin.

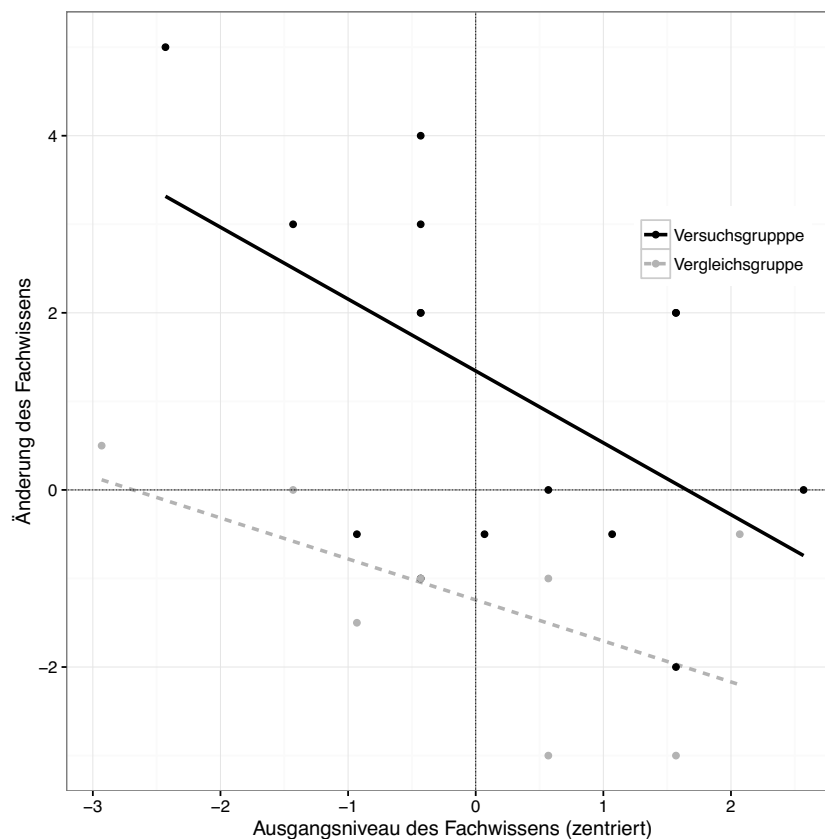


Abbildung 12.11.: Änderung des fachlichen Wissens in Abhängigkeit des Ausgangsniveaus und der Gruppenzugehörigkeit zur Versuchsgruppe oder Vergleichsgruppe

Faktoren für die Änderung des fachlichen Wissens

Die Abbildung 12.11 zeigt das Ergebnis der Regressionsanalyse. Zunächst ist auffällig, dass sich Versuchs- und Vergleichsgruppe hochsignifikant in ihrer Änderung des Fachwissens

¹⁰ LOcally WEighted regression Scatterplot Smoothing: Lokale gewichtete, nichtparametrische Regression (CLEVELAND, 1979)

unterscheiden. Das Modell legt außerdem nahe, dass dies nicht vom Ausgangsniveau des fachdidaktischen Wissens abhängt, jedoch das Ausgangsniveau an Fachwissen eine Rolle spielt, im Vergleich zur Gruppenzugehörigkeit allerdings nur eine untergeordnete Stellung hat. In der Versuchsgruppe zeigen Studenten bei einem durchschnittlichen Ausgangsniveau¹¹ einen Zuwachs von 1,32 Skalenpunkten, die Studenten in der Vergleichsgruppe mit dem gleichen Ausgangsniveau einen um 1,28 Skalenpunkte verringerte Leistung zum zweiten Testzeitpunkt, was jeweils bezogen auf Standardabweichung der Gruppe einer hohen Effektstärke entspricht. In der Versuchsgruppe ist weiterhin erkennbar, dass nur Studenten mit einem sehr hohen Ausgangsniveau, siehe Gruppe 1 in der Clusteranalyse, nicht von dem Seminar hinsichtlich ihres Fachwissens profitieren konnten. Schwächere Studenten profitieren hingegen zunehmend mehr als der Durchschnitt. Die Vergleichsgruppe demgegenüber zeigt eine grundlegende Verschlechterung des Fachwissens über alle Ausgangsniveaus hinweg, wobei der Verlust an Fachwissen auf hohem Ausgangsniveau besonders stark ist.

11 Bitte beachten sie, dass das Ausgangsniveau um den Mittelwert 0, als Maß für das durchschnittliche Niveau, zentriert wurde.

12.4. Regressionsanalyse für die Änderung des fachdidaktischen Wissens

Analog zur Änderung des fachlichen Wissens in Versuchs- und Vergleichsgruppe kann auch für die Änderung des fachdidaktischen Wissen ein lineares Modell mit der Gruppenzugehörigkeit als kategoriale Variable und den beiden Ausgangsniveaus der Kompetenzen erstellt werden.

Modellauswahl

Das Maximalmodell in Tabelle 12.10 wird dabei wieder, falls möglich, schrittweise reduziert. Es wird mit einem maximalen Modell der beiden lehramtsspezifischen Kompetenzen und der Gruppenmitgliedschaft begonnen, das auch Wechselwirkungseffekte berücksichtigt. Für die Reduktion wird wiederum die Summe der Abweichungsfehler des linearen Modells von den empirischen Daten RSS als Entscheidungskriterium genutzt. Diese sollte sich beim Übergang von einem Modell zum anderen nicht signifikant erhöhen, wobei gleichzeitig auch der Erklärungsgehalt des Modells, ausgedrückt durch den Determinationskoeffizienten R bzw. dessen korrigierte Form \hat{R} , sich nicht dramatisch verschlechtern soll.

Anschließend wird das ausgewählte Modell ebenfalls einer grafischen Regressionsdiagnostik unterzogen.

Tabelle 12.10.: Lineare Modelle für die Änderung des fachdidaktischen Wissens im fachdidaktischen Seminar

Modellname	Lineares Modell
Maximalmodell	$\sim \text{Fach} * \text{Fachdid} * \text{Vergleichsgruppe}$
Reduziertes Modell 1a	$\sim (\text{Fach} + \text{Fachdid}) * \text{Vergleichsgruppe}$
Reduziertes Modell 1b	$\sim \text{Fach} * \text{Fachdid} + \text{Vergleichsgruppe}$
Reduziertes Modell 2	$\sim \text{Fach} + \text{Fachdid} + \text{Vergleichsgruppe}$
Reduziertes Modell 3	$\sim \text{Fachdid} + \text{Vergleichsgruppe}$
Reduziertes Modell 4a	$\sim \text{Fachdid}$
Reduziertes Modell 4b	$\sim \text{Vergleichsgruppe}$
Nullmodell	~ 1

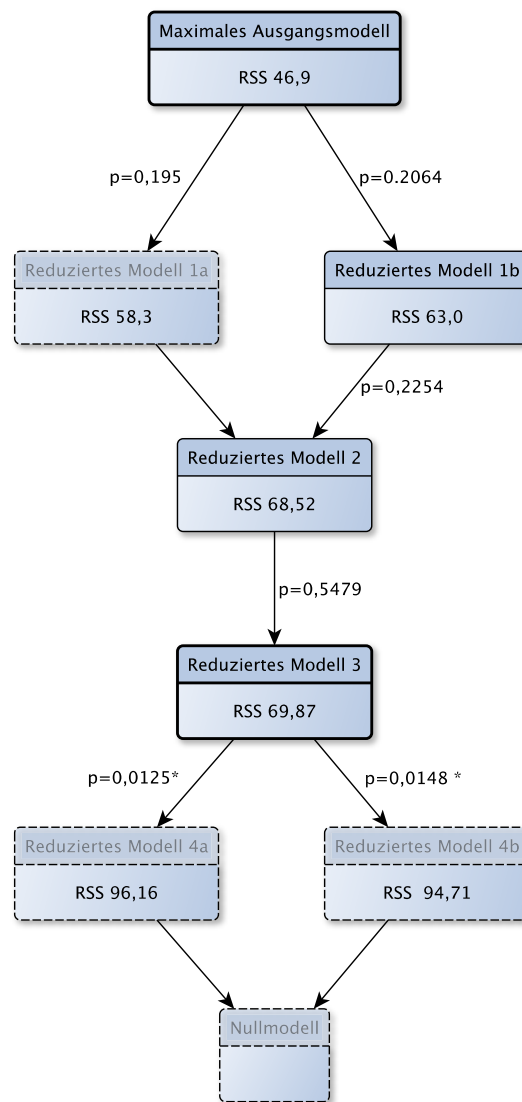


Abbildung 12.12.: Auswahl eines geeigneten linearen Modells für die Entwicklung des fachdidaktischen Wissens im Seminar

In der Abbildung 12.12 sehen Sie den Auswahlprozess über die Parameter aus Tabelle 12.11. Das maximale Ausgangsmodell zeigt keine signifikanten Wechselwirkungseffekte, so dass hier wieder eine Vereinfachung über den F-Test geprüft werden kann¹². Allerdings tritt auf geringem Signifikanzniveau von $\alpha = 10\%$ folgender Effekt auf: In der Seminargruppe hängt der Wissenszuwachs des fachdidaktischen Wissens von Ausgangsniveau des Fachwissens ab. Bei durchschnittlichen Fachwissen unterscheiden sich die Gruppen in der Änderung des fachdidaktischen Wissens hingegen nicht. Die Modelle 1a und 1b sind mögliche Reduzierungsvarianten, wobei die zweite Variante durch höhere erklärte

¹² Die Ergebnisse der vereinfachenden F-Tests finden Sie im Anhangskapitel 27 auf Seite 253.

Tabelle 12.11.: Vergleich der linearen Modelle für die Änderung des fachdidaktischen Wissens

	Maximalmodell						
	Red. Modell 1a	Red. Modell 1b	Red. Modell 2	Red. Modell 3	Red. Modell 4a	Red. Modell 4b	
Konstante	1.90** (0.59)	2.21** (0.58)	1.95** (0.55)	1.97** (0.54)	0.98* (0.46)	1.33* (0.55)	
Ausgangsniveau Fachwissen	-0.65 (0.44)	-0.18 (0.29)	-0.18 (0.30)				
Ausgangsniveau Fachdidaktikwissen	-0.39 (0.25)	-0.49* (0.22)	-0.52* (0.22)	-0.56* (0.21)	-0.32 (0.22)		
in Vergleichsgruppesgruppe	-3.05* (1.05)	-2.79** (0.94)	-2.46* (0.92)	-2.48* (0.90)		-1.46 (0.93)	
WW Fach:Fachdid	-0.02 (0.17)	-0.19 (0.16)					
WW Fach:Vergleichsgruppe	-0.23 (0.90)						
WW Fachdid:Vergleichsgruppe	0.09 (0.58)						
WW Fach:Fachdid:Vergleichsgruppe	-1.37 (0.75)						
R ²	0.56	0.40	0.35	0.34	0.09	0.10	
Adj. R ²	0.35	0.27	0.25	0.27	0.05	0.06	

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, $p < 0.1$ WW: Wechselschwingung zwischen den Faktoren R^2 : unadjustierter und adjustierter Determinationskoeffizient der erklärten Varianz

Varianz und Signifikanz die bessere Wahl ist. Allerdings lassen sich beide Modelle über das Modell 2 weiter auf Modell 3 ohne signifikante Erhöhung der Fehlervarianz vereinfachen. Vereinfachungen des Modells 3 in Richtung 4a oder b würden die Fehlerquadratsumme jeweils signifikant erhöhen und die erklärte Varianz dramatisch verschlechtern, weswegen sie verworfen werden.

Regressionsdiagnostik

In der ersten Grafik der Regressionsdiagnostik zeigt sich ein geringer Zusammenhang von Störgröße und abhängiger Variable, auch die Lowess-Fitkurve verläuft nahezu parallel zur x-Achse. In der zweiten Grafik rechts oben ist die Normalverteilung der Störgröße erkennbar, nur die Ausreißer mit der ID 3 und 12 zeigen stärkere Abweichungen. Die Wurzeln der standardisierten Fehler in Grafik 3 verteilen sich unsystematisch und gleichmäßig über alle gefitteten Werte, so dass von weitgehender Homoskedastizität gesprochen werden kann. Die Hebelwerte in Grafik 4 zeigen sich unkritisch mit Werten für die Cooks-Distanz deutlich unter 0,5. Die Toleranzwerte als Maß für die Multikollinearität mit jeweils 0.82 weisen auf eine sehr geringe Redundanz der Prädiktoren hin.

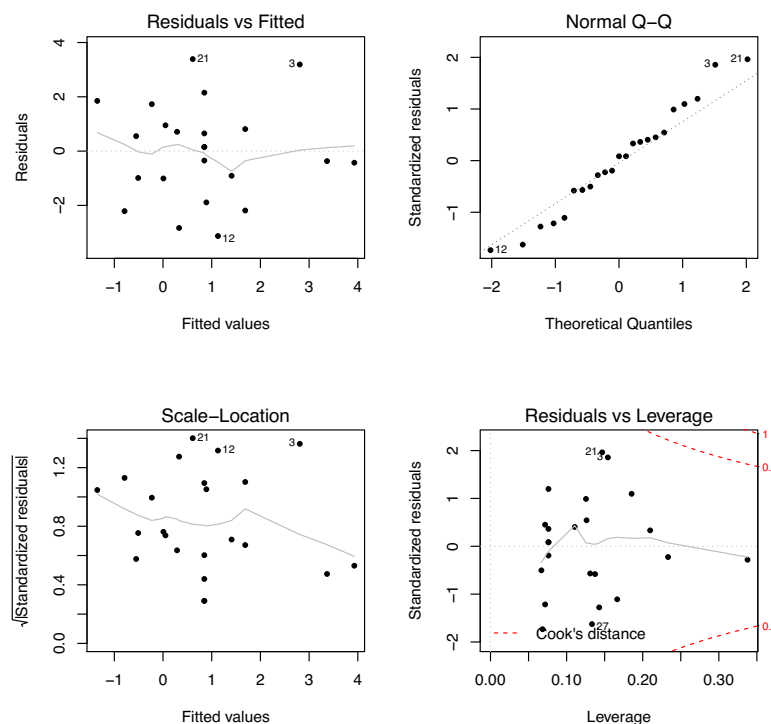


Abbildung 12.13.: Residuenplots des moderierten Regressionsmodells Fachdidaktikwissen von links oben nach rechts unten:
1. Korrekte Modellspezifikation 2. Normalverteilung der Residuen 3. Homoskedastizität 4. Ausreißer

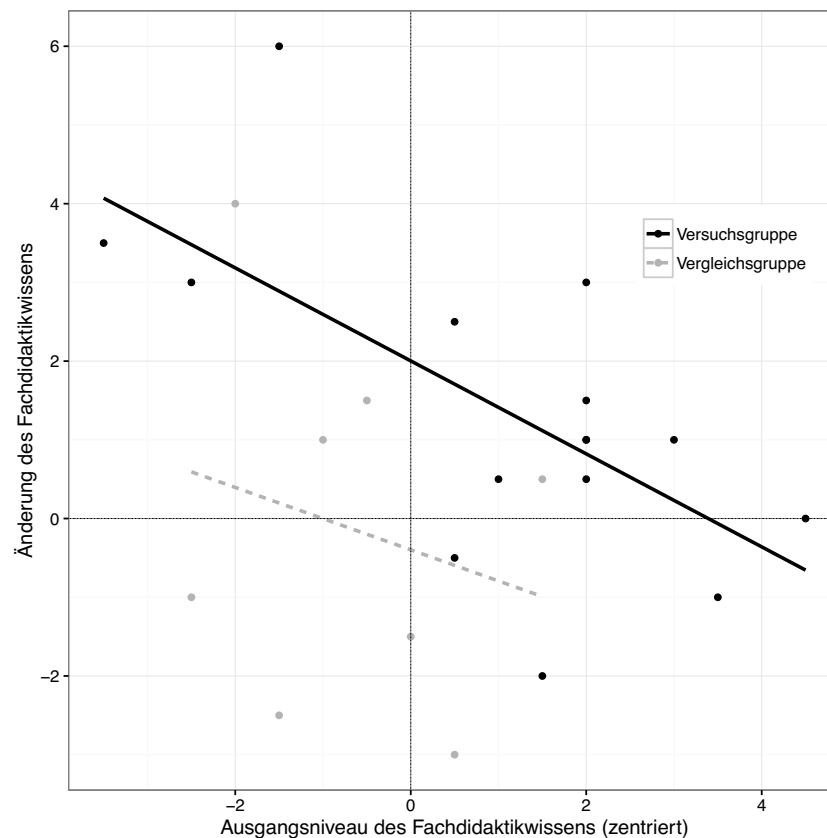


Abbildung 12.14.: Änderung des fachdidaktischen Wissens in Abhängigkeit des Ausgangsniveaus und der Gruppenzugehörigkeit

Faktoren für die Änderung des fachdidaktischen Wissens

Wie die Abbildung 12.14 zeigt, unterscheiden sich die Gruppen signifikant in ihrem Zuwachs des fachdidaktischen Wissens. Dies hängt aber nicht von ihrem Ausgangsniveau im fachlichen Wissen, aber vom Ausgangsniveau des fachdidaktischen Wissens ab. Allerdings gibt es einen Unterschied zum fachlichen Wissen, da die fachdidaktische Kompetenz in der Vergleichsgruppe nicht zwangsläufig abnimmt. So konnten Studenten mit sehr unterdurchschnittlichen fachdidaktischen Wissen, teilweise einen Zuwachs in diesem trotz fehlender Intervention vorweisen, wahrscheinlich da das Seminar der Vergleichsgruppe auch fachdidaktisch orientiert war. Beim durchschnittlichen Ausgangsniveau allerdings nimmt das Fachdidaktikwissen um 0,51 Skalenpunkte in dieser Gruppe ab. In der Versuchsgruppe stieg das Fachdidaktikwissen über fast alle Ausgangsniveaus, insbesondere bei den Lernenden mit geringem Anfangsniveau (Gruppe 4 und teilweise Gruppe 2 in der Clusteranalyse). Nur Studenten mit sehr überdurchschnittlichen Wissen (entspricht der Gruppe 1), konnten vom Seminar nicht profitieren. Bei durchschnittlichen fachdidaktischen Wissen zu Beginn, stieg die fachdidaktische Leistung um 1,97 Skalenpunkte, was bezogen auf Standardabweichung der Gruppe einer mittleren Effektstärke entspricht..

12.5. Auswertung der Concept Maps

Eine ergänzende Evaluation wurde über die von den Studenten am Anfang und am Ende des Semesters angefertigten Concept Maps durchgeführt. Durch diese ist es möglich, inhaltliche Aspekte der Veranstaltung stärker zu charakterisieren. Dabei wurden die Veränderungen bei den Konzepten und Präpositionen am Anfang und Ende des Semesters in der Versuchs- und Vergleichsgruppe, insbesondere bei den zentralen und häufigen Konzepten¹³, untersucht. Zur Ergänzung wurde die Häufigkeit der in den Concept Maps herausstechenden Konzepte in den Unterrichtsentwürfen der Seminarteilnehmer analysiert.

In diesem Abschnitt sollen zunächst Besonderheiten einzelner Concept Maps vorgestellt werden. Aus den einzelnen Maps wurden anschließend eine Durchschnitts-Map mit gewichteten Konzepten und Propositionen¹⁴ erstellt, die im folgenden Absatz analysiert werden soll. Bei mehreren Maps ist zu beobachten, dass quantenphysikalische *Zustände* nach dem Seminar auf kürzeren Wegen mit *Unbestimmtheit* und den häufig neu verwendeten Begriff der *Präparation* in Verbindung gebracht wird. Die Präparation wird von sechs Personen der Seminarteilnehmer in ihren konzipierten Unterrichtsentwürfen verwendet. Weiterhin werden nun in einigen Maps die Begriffe *Unbestimmtheit* und *Unbestimmtheitsrelation* differenziert betrachtet. Ebenso zeigt sich diese Differenzierung bei sieben Unterrichtskonzepten der teilnehmenden Studenten. *Ort* und *Impuls* als feste Eigenschaften von Quantenobjekten tauchen bei vielen der Concept Maps nicht mehr auf, ähnlich verschwinden bei einigen Teilnehmern die Teilchenvorstellung beim Compton- und Photoeffekt. Sehr auffällig ist das deutlich häufigere Auftreten des im Seminar behandelten *Mach-Zehnder-Interferometers* sowie des Begriffes der *Verschränkung*. In den entwickelten Konzepten der Studenten tritt allerdings nur das Mach-Zehnder-Interferometer siebenmal, die Verschränkung hingegen nur zweimal auf. Bei einigen Maps wird die *Superposition* und die *Wellenfunktion/Aufenthaltswahrscheinlichkeit* nun in das Begriffsnetz eingebunden, ebenso in acht bzw. fünf Unterrichtsentwürfen.

Aus didaktischer Sicht ist erfreulich, dass einigen Concept Maps nach Abschluss des Seminars nun Analogien zu quantenphysikalischen Konzepten als Lernhilfen vorhanden sind.

Im Durchschnitt zeigt sich in der Versuchsgruppe, dass neue Begriffe, wie das Experiment mit dem *Mach-Zehnder-Interferometer*, in vielen der Concept Maps hinzukam. Es erfolgte jeweils eine Generalisierung von *Photonen* und *Elektronen* als *Quantenobjekte*, dieser Begriff des Quantenobjekts ist nun außerdem deutlich zentraler und damit vernetzter. Der Begriff tritt auch in fast allen Unterrichtsentwürfen auf. Die *Verschränkung* ist ebenfalls ein neuer, wichtiger Begriff. Der Begriff der *Unbestimmtheit* stieg ebenfalls in seiner Wichtigkeit deutlich, hingegen wurde der *Photoeffekt* weniger wichtig. Der Photo- und Comptoneffekt

13 Zentralität und Häufigkeit im Sinne der Theorie der Concept Maps, siehe Kapitel 11.2.3

14 Die Anzahl der Propositionen und Konzepte, sowie deren Zentralität wurden dabei als Gewichtungsfaktoren zu Grunde gelegt.

spielen auch in den Konzeptionen praktisch keine Rolle. Die *Nichtlokalisierbarkeit* ist in der Versuchsgruppe etwas zentraler, in der Vergleichsgruppe hingegen ist er nicht zentral und zeigt auch keine Veränderung. Allerdings findet er keinen Eingang in die Entwürfe der Seminarteilnehmer.

Hinzu kommen für die Analyse zwei Ergebnisse auf globaler Ebene:

Erstens ist die Übereinstimmung der Propositionen in der Vergleichsgruppe nach der Intervention signifikant größer als in der Versuchsgruppe. Die Konzepte stimmen ebenfalls häufiger überein. Hinzu kommt zweitens, dass in der Vergleichsgruppe die zentralen Konzepte in ihrer Zentralität und Häufigkeit nicht ändern. Die Dichte¹⁵ in den Concept Maps sinkt als Form des Vergessens in der Vergleichsgruppe deutlich stärker als in der Versuchsgruppe, allerdings ist dieser Effekt auf Grund der kleinen Stichprobe, nicht von allen Studenten wurden zwei Concept Maps erstellt, nicht signifikant. Bei der Zerklüftetheit ist weder in Versuchs- noch in der Vergleichsgruppe eine Änderung festzustellen: Keine der Concept Maps war am Anfang zerklüftet und wurde dies auch nicht, einen ähnlichen Bodeneffekt konnte STRACKE (2004b) feststellen.

Durch diese Ergebnisse wird deutlich, dass das Seminar in der Lage ist die kognitive Struktur der Studenten, repräsentiert durch Concept Maps, zu ändern und sich diese Änderung in der Kontrollgruppe nicht zeigt.

Dies konnten auch BATTAGLIA et al. (2010) in einem ähnlich konzipierten Zusatzseminar mit einer Veränderung der verwendeten Begriffe feststellen: „In the final survey more attention is paid to measurement theory, to the incompatibility concept, to the concept of state.“ Außerdem zeigte sich dort eine Abkehr von klassischen Begriffen: „With respect to the reference proposal, it emerges that less attention is given to the knot of quantum particles and trajectories, to the identity of quantum particles, and the role of quantum interference.“

15 Quotient aus Anzahl der Propositionen und maximal möglicher Propositionen bei fester Anzahl von Konzepten

13. Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Kapitel konnte gezeigt werden, dass der Leistungstest ein valides und reliables Testinstrument für fach- und fachdidaktische Kompetenzen darstellt. Die zusätzliche Auswertung von Concept Maps liefert einen ergänzenden, parallelen Ansatz im Sinne des Mixed-Method-Designs (TASHAKKORI und TEDDLIE, 2010).

Im Leistungstest nach Besuch der Theorievorlesungen über Quantenphysik durch die Lehramtsstudenten lassen sich diese in vier wesentliche Gruppen, ähnlich wie bei GRAMZOW et al. (2011), einteilen. Die kleine Gruppe von sehr Leistungsstarken besitzt sowohl im Fachlichen wie im Fachdidaktischen eine so hohe Kompetenz, dass eine Steigerung dieser beiden Kompetenzbereiche im Vergleich zum Durchschnitt geringer ausfällt. Eine sehr große Gruppe mit über der Hälfte der Studenten sind fachlich leicht unterdurchschnittlich bis durchschnittlich und fachdidaktisch durchschnittlich einzuschätzen. Die letzte, kleinere Gruppe ist fachlich leistungstärker als die vorhergehende, zeigt aber Defizite beim Erkennen von Schülervorstellungen und der Umsetzung unterrichtspraktischer Konzeptionen.

Der Posttest zeigt eine starke Verbesserung mit hohem Effekt für das fachliche Wissen allein in der Versuchsgruppe. Die große Gruppe 2 der Clusteranalyse der Fachdidaktikorientierten profitiert dabei insbesondere davon, dass die Leistungssteigerung bei Studenten mit unterdurchschnittlichem Ausgangsniveau besonders hoch ist, wie die Berechnung eines linearen Modells für die Einflussfaktoren zeigt. Das Ausgangsniveau des fachdidaktischen Wissens spielt dabei keine Rolle. Bei der Vergleichsgruppe zeigt sich eine Verschlechterung mit hoher Effektstärke, insbesondere ist der Verlust des Fachwissens für Studenten mit hohem Ausgangsniveau besonders stark.

Beim fachdidaktischen Wissen zeigt sich eine Zunahme mit mittlerem Effekt in der Versuchsgruppe, die Vergleichsgruppe hingegen stagniert auf ihrem Niveau. d.h. sie zeigt keine signifikanten Veränderungen, nur sehr unterdurchschnittlich kompetente Studenten konnten eine Verbesserung ihrer Leistungen trotz fehlender Intervention erzielen, wahrscheinlich auf Grund des Einflusses anderer fachdidaktischer Lerngelegenheiten. Die Studenten der fachstarken Gruppe 4 mit geringem fachdidaktischen Ausgangsniveau profitieren sehr, da diese laut dem berechneten linearen Modell besonders große Verbesserung in der fachdidaktischen Kompetenz erzielen. In der Versuchsgruppe konnten nur die sehr überdurchschnittlichen Studenten, wie die Gruppe 1 der Clusteranalyse, keinen Zuwachs in den beiden Kompetenzen erzielen. Die Änderung des fachlichen und fachdidaktischen Wissens sind oft miteinander verbunden, die Kompetenzsteigerung bzw. -verringerung

zeigt sich in beiden Kompetenzen oft gleichmäßig.

Die ergänzende Auswertung der Concept Maps belegt eine deutlich vergrößerte Dynamik in der Wissensstrukturierung der Seminarteilnehmer mit neuen und zentraleren quantenphysikalischen Konzepten und Propositionen bei einer gewissen, erhöhten Steigerung der Verknüpfungsdichte, wie auch die Untersuchung von STRACKE (2004b) zeigt. Dies lässt auf eine beginnende Änderung der kognitiven Struktur der Teilnehmer der Versuchsgruppe schließen.

Abschließend lässt sich feststellen: Das mit den Anforderungen von Dozenten und Studenten aus Teil II im Teil III geplante fachdidaktische Seminar zur Ergänzung der theoretischen Ausbildung in der Quantenphysik zeigt eine gute Steigerung der lehramtsspezifischen Kompetenzen über ein breites Spektrum an Leistungsstufen.

Teil V.

Zusammenfassung und Implikationen

Die vorliegende Arbeit untersucht, wie die Lehramtsausbildung in moderner Physik - speziell am Beispiel der Quantenphysik - durch eine adäquate Gestaltung der fachdidaktischen Anteile verbesserbar ist. Dabei wurden sowohl theoretische Überlegungen im Modell der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion und die Befragung von Lehramtsstudenten und Dozenten einbezogen und aufbauend ein fachdidaktisches Zusatzseminar geplant und evaluiert.

Im ersten Teil wurde der lerntheoretische Rahmen der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion innerhalb des pädagogischen Konstruktivismus und der Conceptual Change-Theorie abgesteckt. Die Komponenten der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion wurden dann für die Quantenphysik analysiert und in Verbindung mit den Untersuchungen der im nächsten Teil folgenden Anforderungsanalyse gebracht. Es folgte abschließend die Darstellung des Forschungsstandes zum Professionswissen.

Der zweite Teil, die Anforderungsanalyse, beleuchtete die Einschätzung der Vorlesungsinhalte, deren Ziele und erworbener Kompetenzen sowohl durch Lehramtsstudenten wie Dozenten. Hinzu kamen die Einschätzung geeigneter Schulinhalte und wichtiger quantenphysikalischer Konzepte als Bestandteile der didaktischen Rekonstruktion. Als entscheidender Punkt wurden schließlich die Anforderungen an die fachdidaktische Ausbildung zu diesem Themengebiet analysiert.

Aus den beiden vorangegangenen Teilen konnte im dritten Abschnitt ein Seminar zur Didaktik der Quantenphysik kompetenzorientiert geplant und im vierten Teil hinsichtlich fachlicher und fachdidaktischer Kompetenzen, insbesondere der Änderung der kognitiven Struktur mit Hilfe von Concept Maps, sowohl quantitativ als auch qualitativ evaluiert werden.

In folgenden abschließenden Teil der Arbeit werden theoretische Argumentation und empirische Ergebnisse zusammengefasst und reflektiert. Er schließt mit einer Erörterung der Implikationen für die physikdidaktische Lehramtsausbildung und einem Ausblick auf weiterführende Fragestellungen.

14. Zusammenfassung der Ergebnisse

Für die theoretische Fundierung dieser Arbeit wurde das Modell der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion auf das Fachgebiet der Quantenphysik angepasst und im Hinblick auf die einzelnen Komponenten durch Literaturrecherche und eigene explorative Befragungen in der Anforderungsanalyse ausgewertet.

Die Theoriebasis wurde für die Planung einer fachdidaktischen Ergänzung zur Quantenphysik verwendet und diese in ihrer Lernwirksamkeit für fachliche wie fachdidaktische Kompetenzen der Lehramtsstudenten evaluiert

14.1. Theorie

Die Hochschuldidaktische Rekonstruktion fußt auf der konstruktivistisch orientierten Lernpsychologie, in klarer Trennung zum epistemologische Konstruktivismus als wissenschaftstheoretisches Konstrukt. Der lernpsychologische Konstruktivismus nimmt an, dass das Lernen ein individueller Konstruktions- und Repräsentationsprozess der Welt ist. Diese Prozesse hängen stark vom Lernenden und seiner Erfahrung, in naturwissenschaftlicher Hinsicht von seinen (Prä-)Konzepten, ab, werden aber auch durch soziale Interaktion beeinflusst (Duit in DUIT, 1991, S.68ff).

Ein weiterer Baustein des theoretischen Fundaments ist der Fachbegriff des Conceptual Change, er beschreibt die Veränderung des begrifflichen Verständnisses eines physikalischen Konzeptes. Dieser Konzeptwechsel umfasst die Elaboration von Konzepten durch das Bewusstwerden des eigenen Lernprozesses. Damit gehen die Erhöhung des kognitiven Verarbeitungslevels und die Verbesserung der Problemlösefähigkeiten einher (DUIT, 1991, S.30). Die entstehenden konzeptuellen Modelle sind kognitive Repräsentationen realer Gegenstände, die konsistent mit wissenschaftlichen Vorstellungen sind. Sie sind weiterhin dynamisch, lassen sich mental manipulieren, um kausale Erklärungen und Vorhersagen physikalischer Phänomene zu treffen und fußen auf der darunterliegenden Wissensstruktur. Mentale Modelle entstehen meist spontan in spezifischen Problemlösesituationen, können aber, falls sie sich als nützlich erweisen, auch im Langzeitgedächtnis gespeichert werden. Misskonzepte entstehen, wenn Lernende versuchen inkonsistente Informationen zu integrieren und damit künstliche, ab einem bestimmten Level inviable mentale Modelle zu erschaffen.

Es kann nach Überzeugung vieler Didaktiker in der Quantenphysik nur eine sprunghafte Ausbildung einer neuen Sichtweise geben, da sich hier lebensweltliche und physikalische Sichtweisen grundsätzlich unterscheiden und es keinen kontinuierlichen Weg zwischen diesen Blickwinkeln geben kann. Dieser Bruch wird auch bei den studentischen Schwierigkeiten deutlich. Nach konstruktivistischer Auffassung muss der Konzeptwechsel von jedem Lerner individuell vollzogen werden. Dies ist aber nicht nur eine rationale Entscheidung, da motivationale und affektive Faktoren ebenfalls eingehen und der Konzeptwechsel, wie Lernen allgemein, an die soziale Lernsituation gebunden ist. Ein wesentlicher Punkt des Wechsels ist das Bewusstwerden der Vorstellungen des Lerners durch Explizit-Machen als metakognitive Tätigkeit.

MÜLLER (2003b) fasst eine Vielzahl an Monografien zu Schülervorstellungen zusammen, dabei zeigt sich, dass quantenphysikalische Konzepte von den Lernenden in bereits vorhandene Vorstellungsmuster assimiliert und vielfältige Erklärungsmuster für Phänomene in eng begrenzten Domänen aufgebaut werden. Es fehlt aber eine Anpassung des kognitiven Systems (Akkommodation) an die neuen Konzepte. Die dadurch entstehenden Mischformen mit stark mechanistischer Note, beispielsweise beim Welle-Teilchen-Dualismus, werden nicht als Problem erkannt. Konzepte, die hauptsächlich aus der klassischen Physik und Alltagsvorstellungen herrühren, dominieren stark bei den Schülern. Diese haben sich als sehr stabil und in der klassischen Physik natürlich auch als viabel herausgestellt, so dass deren Überwindung und der Aufbau eines neuen quantenphysikalischen Weltbildes äußerst schwierig ist.

Ähnliche Probleme zeigen aber auch Studenten, beispielsweise bei der Annahme einer permanenten Lokalisierung von Quantenobjekten, z.B. beim Bohrschen Atommodell, bei der fehlenden Kenntnis der ontologischen Unbestimmtheit oder eines Konzeptes für die Verschränkung. Oft haben sie sich nur daran gewöhnt, notwendige formale Rechnungen durchzuführen ohne geeignete mentale Modelle quantenphysikalischer Konzepte zu entwickeln, wodurch sie nicht in der Lage sind, eine qualitative Schlussfolgerung aus den quantitativen Berechnungen zu ziehen. Die Vorstellung diskreter Bahnen scheint außerordentlich stabil zu sein, da quantenmechanische Modifikationen häufig auf diese aufgesetzt werden. Auffällig ist der Rückgriff auf Schulwissen, die Universität vermag es nicht, ein quantenmechanisch adäquates Bild zu vermitteln, welches aber für die Planung eines geeigneten Unterrichtsganges notwendig wäre. Diese Fehlvorstellungen, die Studenten und Schüler oft teilen, dienen sowohl im didaktischen wie im hochschuldidaktischen Dreieck als Anlass zum Entwurf von Lernumgebungen, denn die Vorstellungen „sollten deshalb nicht allein aus der fachlichen Perspektive als Fehlvorstellungen beurteilt werden, die es zu beseitigen gilt. Vielmehr sollte nach Möglichkeiten gesucht werden, wie die Lernervorstellungen und die fachlich geklärten Vorstellungen im Unterricht [...] zusammengebracht werden können“ (LOHMANN, 2006, S.68). Die Fachdidaktik nimmt dabei eine doppelte Metaposition als Teil und Gegenüber der Fachwissenschaft und Vermittler zwischen dieser und der Lebenswelt der Schüler und Studenten und ihren Vorstellungen ein. Die

Lehramtsstudenten lernen durch diese Art den Unterricht zu konzipieren nicht nur die eigenen Vorstellungen zu reflektieren, sondern auch geeignet auf Schülerpräkonzepte zu reagieren. Hinzu kommt nach LOHMANN (2006, S.65), da „zwischen dem Lernen in der Schule und Lernen an der Universität kein qualitativer Unterschied besteht, liegt es nahe, Erkenntnisse und Methoden sowie Lehr- und Lernstrategien aus dem schulischen auf den Hochschulbereich zu übertragen.“ LOHMANN (2006) fasst sein Modell zusammen: „Die Wirksamkeit der Lehrerbildung ist also in hohem Maße davon abhängig, inwieweit das Vorwissen und die vorhandenen Vorstellungen der Studierenden zum Lehren und Lernen in ihrem Fach berücksichtigt werden. Die konsequente Übernahme eines konstruktivistischen Lehr- und Lernbegriffs in die Lehrerbildung erfordert von den fachdidaktischen Lehrveranstaltungen, dass nicht nur (wie z.B. im Modell der Didaktischen Rekonstruktion) Schülervorstellungen zu fachlichen Bereichen thematisiert werden, sondern auch das Vorwissen und die Vorstellungen der angehenden Lehrer über das Lehren und Lernen in diesen Bereichen.“ Das Modell von LOHMANN (2006) berücksichtigt neben fachlichem Wissen und Lehr-Lernvorstellungen von Studierenden auch subjektive Theorien sowie normative und affektive Komponenten.

Die Darstellung von VAN DIJK und KATTMANN (2007), als ERTE-Modell bezeichnet, ist dem Modell von Lohmann sehr ähnlich, legt aber besonderen Wert auf Integration eines spezifischen pedagogical content knowledge (PCK) für naturwissenschaftliche Lehrer, welches als PCK-S bezeichnet wird. Es umfasst Fachwissen über Lehr-/Lernprozesse, hinsichtlich des Designs von Lernumgebungen, der damit verbundenen Analyse von Schülervorstellungen und des fachlichen Wissens, welches sich Lehrer während ihrer individuellen Lehrerfahrung im Unterricht aneignen. Es stellt eine Rekonstruktion und damit Verallgemeinerung aus individueller Unterrichtspraxis dar und dient der Entwicklung neuer Lernumgebungen, die auch an andere Lehrer vermittelt werden können. Ziel des ERTE-Modells ist zum einen die Analyse fachdidaktischer Konzeptionen zum Anlass zu nehmen, diese mit empirischen Untersuchungen von Lehrerperspektiven in Beziehung zu setzen und damit zum anderen Leitlinien für die Lehrerbildung und die Unterrichtsentwicklung abzuleiten. Die Perspektive der Lehrer schließt deren Wissen und Überzeugungen zu Präkonzepten von Schülern, zu Repräsentationen des Fachwissens und dem Design von Lernumgebungen ein. Die fachdidaktische Klärung wird bei (LOHMANN, 2006) weiter als beim Modell von VAN DIJK und KATTMANN (2007) gefasst, da es zusätzlich die kritische Untersuchung von fachdidaktischen Aussagen, Prinzipien, Leitlinien, Unterrichtskonzepten und Curriculumeinheiten aus Schul- und Hochschulsicht enthält.

Die didaktischen Ansätze zur Quantenphysikausbildung fokussieren auf unterschiedliche fachliche Aspekte. So sieht das Frankfurter Konzept nach POSPIECH (2000) als wesentlichen Ansatz die Herausarbeitung der Unterschiede und Unvereinbarkeit von Quantenmechanik und klassischer Physik, wobei auch das Zusammenwirken philosophischer und physikalischer Fragestellungen, wie beispielsweise zur Wirklichkeit und dem Holismus von Materie, oder der Indeterminismus im Messprozess eine Rolle spielen. Dadurch wird eine Erweiterung

des Schülerweltbildes mit kognitiver Dissonanz durch Umsturz des klassischen Weltbildes erreicht. Als zentraler Begriff wird der Messprozess angesehen, für dessen Verständnis außerdem der Begriff der Information von großer Bedeutung ist. Basis für das Verständnis beider Begriffe kann nach Pospiech das Doppelspaltexperiment mit der Untersuchung von Welcher-Weg-Informationen sein. Eng damit zusammen hängt der neue Begriff der quantenphysikalischen Unbestimmtheit im krassen Gegensatz zum klassischen Teilchenmodell und dessen determinierten Bahnen, welche auch in diskreter Form im Bohrschen Atommodell in Erscheinung treten.

MÜLLER et al. (2000) sehen als wichtigste fachliche Komponente die Behandlung paradigmatischer Experimente, wie das Doppelspaltexperiment, an dem sich vielfältige Themen wie Komplementarität und Zustandsreduktion behandeln lassen, aber selbst eine Neuformulierung von Schrödingers Katze möglich ist. Hinzu kommen experimentelle Umsetzungen von weiteren früheren Gedankenexperimenten, außerdem werden Deutungsfragen wie beispielsweise zur Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation als wichtige fachliche Konzepte behandelt (WIESNER, 2008).

Für die Analyse der Schulebene wurden in dieser Arbeit drei Konzepte genauer betrachtet: Das Münchner Konzept (WIESNER, 2008) berücksichtigt bekannte Lernschwierigkeiten, die sich aus den genannten Schülervorstellungen, aber auch aus der Abstraktheit der Theorie ergeben und bemüht sich besonders um die Klärung begrifflicher Aspekte. Eine Vereinfachung wird durch geeignete Begriffe wie „Präparation“ und „dynamische Eigenschaft“ und der konsequenten Nutzung der Bornschen Wahrscheinlichkeitsinterpretation unter Vermeidung eines Welle-Teilchen-Dualismus erreicht. Die Grenzen des Bohrschen Atommodells werden verdeutlicht und durch ein angemessenes quantenphysikalisches Orbitalmodell ersetzt. Auf Grund der Schwierigkeit, rein quantenphysikalische Experimente durchzuführen, werden viele Simulationsprogramme, beispielsweise das Mach-Zehnder-Interferometer als Quantenradierer oder das Doppelspaltexperiment mit Einzelphotonen als IBE genutzt.

Die seit 2001 bestehende und auf das Schulkonzept aufbauende webbasierte Lehrerfortbildung milq wurde 2010 um eine ausgearbeitete, beispielhafte Unterrichtseinheit im Blended-Learning-Design zur Quantenphysik für die Sekundarstufe 2 SPQR erweitert (DAMMASCHKE et al., 2010). Sie enthält E-Learning-Einheiten – als Einzel- oder Partnerarbeit – mit abschließender Präsentations- und Plenumsphase und fokussiert auf die selbständige Bearbeitung im Sinne eines gemäßigten pädagogischen Konstruktivismus.

Das Frankfurter Modell nach POSPIECH (2004) wählt den Einstieg in die Quantenphysik über die Optik. Neben der physikalischen Erklärung grundlegender, auch moderner, experimenteller Ergebnisse konzentriert sich der Lehrgang auf einen philosophischen Dialog, insbesondere auf das Zusammenwirken der Analyse beider Fachgebiete. Es wird weiterhin versucht an das Schülervorwissen anzuknüpfen, da aber die Quantenphysik wenig den Alltagserfahrungen entspricht, sondern ihnen vielmehr vollkommen konträr ist, ist ein möglicher Anknüpfungspunkt, gerade die Begrenztheit dieser Verbindung aufzuzeigen und damit eine Diskussion über Modelle und deren Interpretationen in der Physik zu ermög-

lichen. Die Grundlage des Lehrganges sind einfache, vom Schüler selbst durchführbare Analogieexperimente, welche Lust auf exaktere mathematische Modellierung wecken sollen. Eng mit dem Frankfurter Modell verwandt ist das schulische Dirackonzept nach MICHELINI et al. (2014). Es richtet die Aufmerksamkeit besonders darauf, keinen fortgeschrittenen mathematischen und physikalischen Hintergrund zu benötigen, und veranschaulicht einfache Zwei-Zustand-Systeme mittels linearer Polarisation von Photonen mit Polarisationsfolien und doppelbrechenden Kristallen, wodurch das Verhältnis physikalischer Observablen und linearer Operatoren im konzeptuellen wie formalen Sinne geklärt werden kann.

Ein Beispiel für die hochschuldidaktische Strukturierung eines Quantenphysikkurses ist das bereits erwähnte *Milq*: Der qualitative Basiskurs umfasst sieben Kapitel und behandelt die Präparation von Photonen und Elektronen als Welle und Teilchen, statistische Aussagen der Quantenphysik, die Besonderheiten des Messprozess und die Unbestimmtheit.

An diesem Basiskurs kann sich ein quantitativer Aufbaukurs mit acht Kapiteln anschließen, der zum mathematischen Formalismus über die Schrödingergleichung hinführt, diese eng verbunden mit Potenzialen und Tunneleffekt als Anwendung verdeutlicht und schließlich das Wasserstoffatom behandelt. Zusätzlich werden vertiefend der Photoeffekt, die Elektronenbeugung, Quanteninterferenzen, der Messprozess und die Unbestimmtheitsrelation bearbeitet.

Als dritte Säule sind Spezialgebiete als Wahlthemen vorhanden. Moderne Anwendungen wie Quantenkryptografie, Quanteninformationstheorie und Quantenteleportation, aber auch fachdidaktische Ansätze wie Quantenspiele und Aufsätze über Schülervorstellungen oder Zeigerformalismus können gewählt werden.

Bezogen auf die Ausbildung an der TU Dresden wird ein Großteil der fachlichen Themen bereits in den Theorievorlesungen behandelt. Interessant an diesem Weiterbildungskonzept ist für die Erstausbildung von Lehramtsstudenten die nicht behandelten fachlichen Teile wie Verschränkung und Themen der aktuellen Diskussion wie Rydberg-Atome, Quantencomputer oder Greenberger-Horne-Zeilinger-Korrelationen. Entscheidend sind jedoch die fachdidaktischen Erweiterungen, wie z.B. Hintergrundinformationen zu Lehrplanthemen wie Problemen bei der Einführung des Photoeffekts und der Photonhypothese, Einzelspaltableitungen der Unbestimmtheitsrelation, Energie-Zeit-Unbestimmtheit, aber auch Deutungsfragen zur Kopenhagener Deutung oder Viele-Welten-Interpretation. Diese Aspekte wurden für das eigene fachdidaktische Seminar in der Lehramtsausbildung in Dresden genutzt. Die Bohr-Einstein-Debatte, die Sichtweise der statistischen Deutung, aber auch des EPR-Paradoxons, der Bellschen Ungleichung oder verborgener Parameter wurden wie im *Milq*-Konzept vertieft und schließlich ein Überblick für ausgearbeitete schulische Unterrichtsgänge, wie SPQR im Münchner Konzept, gegeben.

Ein weiteres hochschuldidaktische Konzept nach BATTAGLIA et al. (2010) ist ebenfalls eine Erweiterung eines Schulmodells - des Dirackonzepts - und legt besonderen Wert auf die Überwindung von Präkonzepten bei Lehrern und der Integration von fachlichem und fachdidaktischem Wissen durch praktische Anleitung zur Erstellung eines eigenen

fachdidaktischen Vorschlags zur Vermittlung der Quantenphysik. Die Planung eines Unterrichtsganges im Dresdner Seminar lehnt sich an dieses an. Auch hier wird, wie im vorangegangenen Modell, zunächst das konzeptuelle Verständnis weitestgehend qualitativ und erst später durch Hinzunahme des mathematischen Formalismus aufgebaut.

14.2. Konzeption und Empirie

Durch die Kombination verschiedener methodischer Verfahren konnten im Bereich der Fachdidaktik der Quantenphysik zunächst die Anforderungen von Lehramtsstudenten und Dozenten an eine adäquate Ausbildung ermittelt und ein, die Theorievorlesungen ergänzendes, fachdidaktisches Seminar konzipiert und schließlich hinsichtlich des fachlichen und fachdidaktischen Wissens positiv evaluiert werden.

Werden Dozenten zu ihren Anforderungen befragt, so wird deutlich, dass sie mehr Wert auf Konzepte, Anwendungen/Beispiele, aber vor allem auf den Formalismus als Studenten legen. Die philosophischen Interpretationsfragen kommen trotz anders lautender, vor den Vorlesungen formulierter Lernziele zu kurz. Studenten sehen sich im Gegensatz zum fachlichen Wissen durch die Vorlesungen in theoretischer Physik fachdidaktisch schlecht auf den Schuldienst vorbereitet, dies betrifft auch die fachliche Vermittlungskompetenz. Sie interessieren sich für die fachdidaktische Ausbildung, aber nicht ausschließlich für praktische Fragen zum Unterricht, wie fachdidaktische Fragen zum Schülervorverständnis und unterrichtspraktischen Methoden, sondern das Interesse der, mit 67 Prozent, größten Gruppe der verständnis- und anwendungsorientierten Studenten liegt zusätzlich bei Anwendungen, Konzepten und deren Interpretation.

Konzepte, Anwendungen und Beispiele nehmen als Themen der Lehrveranstaltungen einen breiten Raum ein sowohl aus Sicht der Studenten als auch der Lehrenden, der Formalismus spielt scheinbar bei Dozenten eine untergeordnete Rolle, da er als immanent notwendig betrachtet wird. Studenten nehmen diesen aber als beherrschendes Thema wahr. Die Behandlung der philosophischen Probleme der Quantenphysik wird von den Dozenten als Ziel genannt, aber kaum umgesetzt. Sie planen selten Vorlesungsinhalte zu Unterrichtsmethoden, setzten diese praktisch nicht um, obwohl Methodikwissen zumindest teilweise als Kompetenz angestrebt wird.

Im Test der Leistungsfähigkeit vor dem fachdidaktischen Seminar zeigten sich zwei mit 16 Prozent kleine Gruppen besonders leistungsstarker bzw. -schwacher Studenten. Die mit über der Hälfte der Lehramtsstudenten größte Gruppe ist eher fachdidaktisch orientiert, sie sind fachlich eher schwach bis durchschnittlich und fachdidaktisch durchschnittlich leistungsfähig. Hinzu kommt eine vierte Gruppe leistungsstarker Studenten, die allerdings Schwächen beim Erkennen und Reagieren auf Schülervorstellungen und bei der Konzeption des Übergangs zwischen verschiedenen physikalischen Modellen zeigt. Vor allem die beiden letzten Gruppen können stark von der zusätzlichen fachdidaktischen Ausbildung profitieren.

Aus der Analyse der Anforderungen ergaben sich folgende Konsequenzen für die Planung des fachdidaktischen Zusatzangebotes:

1. Formale Aspekte werden in den Theorie-Vorlesungen ausreichend behandelt.
2. Facetten der Geschichte der Quantenphysik können, müssen aber nicht ausgebaut werden.
3. Es muss eine Transformation des Fachwissens in praxisnah verfügbare Fähigkeiten geben.
4. Es besteht ein hoher Bedarf an praxisnahem fachdidaktischem Wissen, beispielsweise bei
 - der Konzeption von Unterrichtsgängen und beim
 - dem Umgang mit Schülervorstellungen.
5. Es besteht ein hoher Bedarf an Beispielen und Anwendungen, besonders für die Einbettung quantenphysikalischer Konzepte in den Unterricht.

Aus diesen Punkten können sowohl fachliche wie fachdidaktische Ziele für das Seminar abgeleitet werden. Hinsichtlich fachlicher Ziele werden folgende Kompetenzen angestrebt: Die Studenten

- verstehen die Unterschiede zwischen klassischer Mechanik und Quantenphysik und können diese analysieren.
- kennen und verstehen die für die Schule wichtigen Konzepte der Quantenmechanik.
- können Beispiele für die Anwendung der Verschränkung geben.
- kennen die wesentlichen Experimente der Quantenphysik und
- beurteilen die bedeutsamen, verschiedenen Interpretationsmöglichkeiten.

Hinsichtlich fachdidaktischer Ziele werden folgende Kompetenzen angestrebt: Die Studenten

- wissen wie man wesentliche Konzepte der Quantenphysik vermitteln könnte.
- beurteilen verschiedene Vermittlungskonzepte.
- kennen und analysieren die Schwierigkeiten im Lernprozess, die Schülervorstellungen und -fehllkonzepte.
- kennen Methoden, um auf Schülervorstellungen reagieren zu können.
- evaluieren passende Verfahren und Medien zum Lehren der Quantenphysik und können diese in geeigneten Kombinationen einsetzen.

Darauf aufbauend und mit Hilfe des theoretischen Gerüstes der Hochschuldidaktischen

Rekonstruktion wurde ein Seminar gestaltet, welches viel Wert auf Konzepte, Interpretationen einschließlich philosophischer Aspekte und methodisch-praktische Übungen legt. Die Zeitplanung sah für das Seminar eine Zweiteilung mit fachlich-fachdidaktischen Input und praktischer Umsetzung des Gelernten durch die Studenten vor.

Im ersten Teil wurden wichtige Grundideen der Quantenphysik am Doppelspalt bzw. am Mach-Zehnder-Interferometer vermittelt, dazu gehörten die Superposition, der Messprozess, aber auch fachdidaktische Fragestellungen, beispielsweise zu Schülerpräkonzepten. Hinzu kam die Erläuterung von Interpretationsproblemen zur Unbestimmtheit und Möglichkeiten der vereinfachten Darstellung und Repräsentation dieses Themas. Analog erfolgte die Erläuterung der Verschränkung und des EPR-Experimentes. Es folgte die Darstellung verschiedener Unterrichtskonzepte aus Milq, eines von der ETH Zürich und des Dirac-Konzepts von Michelini, wobei auch auf mögliche Schülerschwierigkeiten bei den einzelnen Darstellungsformen eingegangen wurde.

Der zweite Teil bestand aus der praktischen Umsetzung mit der Entwicklung eines eigenen Unterrichtsganges und der Konzeption einzelner Stunden mit abschließender Präsentation im Plenum.

Die Durchführung des Seminars lieferte positive Ergebnisse für die fachlichen und fachdidaktischen Kompetenzen der untersuchten Lehramtsstudenten im Unterschied zur Vergleichsgruppe. Im fachdidaktischen Wissen konnte ein positives Ergebnis mit mittlerer Effektstärke und im fachlichen Wissen sogar eines mit hoher Effektstärke erzielt werden. Diese Steigerung des Fachwissens ist dahingehend erstaunlich, da das Wissensniveau von den Studenten selbst bereits zu Beginn des Seminars als hoch eingestuft wurde.

Außerdem zeigte sich eine Änderung der kognitiven Struktur der Seminarteilnehmer, dargestellt über Concept Maps, da neue, wichtige und zentrale Begriffe, die nicht in den Theorievorlesungen behandelt wurden, erscheinen und außerdem Änderungen in den Begriffen und ihren Verbindungen auch global als Merkmale des Wissenserwerbs festzustellen sind.

15. Implikation und Forschungsperspektiven

Aus der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion des Themas Quantenphysik und eigenen empirischen Beiträgen sowohl durch die Anforderungsanalyse als auch die Konzeption und Evaluation einer fachdidaktischen Ergänzungsveranstaltung lassen sich Implikationen in der akademischen Lehramtsausbildung ableiten.

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass die Kombination von zunächst fachlicher Ausbildung mit einer fachdidaktischen Vertiefung des Themengebietes Quantenphysik Verbesserungspotential nicht nur für die fachdidaktische, sondern erstaunlicherweise auch stark für die fachliche Kompetenz der Lehramtsstudenten bietet. Durch die methodische Untersuchung und Konzeption des Seminars wird die hohe Praktikabilität des Modells der Hochschuldidaktischen Rekonstruktion nach LOHMANN (2006) und VAN DIJK und KATTMANN (2007) deutlich. Seine große Stärke sind die Möglichkeiten, nicht nur Lernprozesse von Schul- bis zur Hochschulebene zu analysieren, sondern auch strukturiert aufeinander aufbauend planen zu können.

Die vorliegende Arbeit hat einen stark explorativen Charakter, da sie den Fokus auf Studenten des Gymnasiallehramtes an der TU Dresden über einen Zeitraum von drei Semestern legt. Es stellt sich die Frage, ob und wie sich Verbesserungen in der fachdidaktischen Ausbildung dauerhaft auch für andere Bereiche der klassischen und der modernen Physik, wie der Elementarteilchenphysik, implementieren lassen. Interessant wäre eine Ausweitung auf verschiedene Hochschulen mit ihrer doch teilweise recht unterschiedlichen Modul- und Studiengestaltung. Die Konzeptionen des zusätzlichen Seminars folgt den Anforderungen von Studenten und Dozenten und versucht typische studentische Probleme zu vermindern. Allerdings sind die Seminarinhalte und deren Anordnung nicht zwingend. Eine vergleichende Untersuchung verschiedener inhaltlicher wie methodischer Gestaltungskonzepte für fachdidaktische Seminare könnte Optimierungsmöglichkeiten aufzeigen, wobei zwischen für die Ausbildung förderlichen und weniger wichtigen Inhalten und Methoden zu unterscheiden wäre.

Für die umfassende Erforschung all dieser Aspekte ist die Generalisierung auf ein Mehrebenenmodell ratsam, wobei zwischen

1. der Individualebene

2. der Ebene der Seminarinhalte
3. der Ebene der Seminargestaltung
4. der Ebene der Fachgebiete und schließlich
5. der Ebene der Modulgestaltung

zu unterscheiden wäre. All diese Ebenen mit ihren Faktoren haben schließlich Einfluss auf die Kompetenz und Kompetenzentwicklung der angehenden Lehrer.

Neben der erweiterten Untersuchung der konzeptionellen Einflussfaktoren wäre eine Ausdifferenzierung des Testmodells der Kompetenzen wünschenswert. Die einzelnen Teilaspekte des Kompetenztests könnten durch eine zusätzliche Aufnahme von Items genauer analysiert und miteinander verglichen werden. Hinzu könnten auch allgemein-fachdidaktische Fragestellungen als Testbestandteile kommen. Zur breiteren Fundierung des Tests wäre eine Erhöhung des Stichprobenumfangs wünschenswert. Für die genaue Analyse ist aber auch ein größerer Konsens über die Bestandteile fachlicher und vor allem fachdidaktischer Kompetenzen notwendig. REINHOLD (2004, S.130) stellt allgemein für die Untersuchung fachdidaktischer Kompetenzen fest: „Insgesamt gesehen fehlt ein theoretisches Modell, das die verschiedenen Aspekte verbindet. Diese Problematik ist allerdings alles andere als trivial, denn Institutionen und Personen, Faktoren und Prozesse, Ziele, Erwartungen und Interessen, Realbedingungen und Beteiligungsvoraussetzungen bei Bildungsprozessen bilden fast unauflösbare Ursachen, Bedingungs- und Wirkungszusammenhänge.“ Reinholds Analyse hat „deutlich gemacht, dass eine Untersuchung der Wirkung von Lehrerausbildung nicht bei der Feststellung des vermittelten fachlichen, erziehungswissenschaftlichen und fachdidaktischen Wissens stehen bleiben kann. Zu erheben sind auch Kompetenzen, verstanden als die Fähigkeit, dieses Wissen beispielsweise für die Analyse, Planung, Durchführung und Reflexion von naturwissenschaftlichem Fachunterricht zu verknüpfen und situationsbezogen anwenden zu können.“

Schließlich sei noch auf die Möglichkeit der längsschnittartigen Erweiterung hingewiesen, denn ist keineswegs zwingend, dass ein herausragendes Kompetenzprofil im Studium eine hohe Professionalität des angehenden Lehrers in der Schule zur Folge hat. Die langfristigen Auswirkungen auf die Kompetenz bei einem zusätzlichen fachdidaktischen Angebot für spezielle Themenbereiche sind von großer Bedeutung. Auch KIRSCHNER (2013) nennt als wichtigstes Forschungsziel im Ausblick ihrer Dissertation die Ergründung des Zusammenhangs zwischen Wissen einerseits und dem Handeln der Lehrkräfte im Unterricht und der sich schließlich daraus ergebenden Schülerleistung und -motivation andererseits. Forschungsansätze in diese Richtung existieren bereits, wie beispielsweise im Rahmen der ProWiN-Studie (FISCHER et al., 2011), bedürfen aber noch einer detaillierten Auswertung. Die in dieser Arbeit vorgenommenen Gruppierungen könnten erweitert werden. GRAMZOW et al. (2011) schlagen dazu vor: „Weiterhin ließe sich eine Typisierung vielleicht von Studierenden auf Referendare oder schon ausgebildete Lehrer ausweiten, um – idealerweise im

Rahmen einer echten Längsschnittstudie – zu untersuchen, ob die gefundenen Profile weiter Bestand haben oder durch die zweite Ausbildungsphase vielleicht verändert werden.“ Durch diese geforderte Untersuchung könnte das Verhältnis von Theorie- und Praxisanteilen in der ersten und zweiten Phase der Lehramtsausbildung genauer analysiert und dadurch besser gestaltet werden.

Als letzter Aspekt ist die Verbesserung der Medien für eine adäquate Seminargestaltung für spezielle, fachdidaktische Themen zu nennen. MCKAGAN et al. (2010) stellt in seiner Untersuchung von Hochschullehrbüchern zur Quantenphysik fest: „[...] most textbooks included little or no discussion of the issues most frequently raised in the physics education research literature on quantum mechanics. For example, most textbooks do not discuss whether particles move in sinusoidal paths, whether energy is lost in tunneling, or how to determine the qualitative shape of a wave function from a potential.“ Zwar gibt es mit einzelnen Lehrbüchern wie SCHILCHER (2010), auch speziell für die Quantenphysik mit SCHMÜSER (2012), erste Ansätze, doch besteht hier noch ein starker (Nachhol-)Bedarf an lehramtsspezifischer Literatur, die eine echte Bereicherung für fachdidaktische Seminare in der Lehramtsausbildung sein könnte.

Anhang

16. Clusteranalyse Studenten Vorlesungsinhalte

Tabelle 16.1.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Kruskal-Wallis-Test (Mitte) und zugehörige robuste Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für **Diracformalismus/Zeitentwicklung**

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	12.17	0.0000
	88		

	Df	Chi Squ	Pr(>Chi)
group	2	28	7e-07

	Gruppe 1	Gruppe 2
Gruppe 2	5e-05	
Gruppe 3	1.1e-08	0.023

Tabelle 16.2.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für **Math. Formalismus/Schrödingergleichung**

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	1.03	0.3597
	88		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach3	2	0.045	0.022	1	0.3597
Residuals	9e+01	1.9	0.022		

Tabelle 16.3.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für **Geschichte**

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	1.64	0.2002
	88		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach3	2	0.8	0.4	1.6	0.2002
Residuals	9e+01	21	0.24		

Tabelle 16.4.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Kruskal-Wallis-Test (Mitte) und zugehörige robuste Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich für **Compton- & Photoeffekt**

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	3.24	0.0438
	88		

	Df	Chi Squ	Pr(>Chi)
group	2	31	2e-07

	Gruppe 1	Gruppe 2
Gruppe 2	1.3e-06	
Gruppe 3	0.18	0.0001

Tabelle 16.5.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für **Bilder**

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	1.62	0.2040
	88		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach3	2	3.98	1.99	9.38	0.0002
Residuals	88	18.70	0.21		

	Gruppe 1	Gruppe 2
Gruppe 2	0.00	
Gruppe 3	0.01	0.12

Tabelle 16.6.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für **Quantenzahlen**

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	0.64	0.5323
	88		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach3	2	7.93	3.96	23.54	0.0000
Residuals	88	14.82	0.17		

	Gruppe 1	Gruppe 2
Gruppe 2	0.00	
Gruppe 3	0.27	0.00

Tabelle 16.7.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für **Potenziale**

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	1.16	0.3187
	88		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach3	2	1.9	0.93	4.3	0.01604
Residuals	9e+01	19	0.21		

	Gruppe 1	Gruppe 2
Gruppe 2	0.49	
Gruppe 3	0.02	0.01

Tabelle 16.8.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für **Drehimpuls/Spin/Wasserstoff**

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	1.36	0.2608
	88		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach3	2	3.2	1.6	16	9.004e-07
Residuals	9e+01	8.6	0.098		

	Gruppe 1	Gruppe 2
Gruppe 2	0.14	
Gruppe 3	0.00	0.00

17. Clusteranalyse Studenten

Zusatzinhalte

Tabelle 17.1.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Kruksal-Wallis-Test (Mitte) und zugehörige robuste Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für **Anwendungen/Beispiele**

	Df	F value	Pr(>F)
group	3	8.59	0.0001
	78		

	1	2	3
df	3	74	7.2e-16

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 2	8.3e-17		
Gruppe 3	0.0034	0.00015	
Gruppe 4	7.1e-09	0.034	0.29

Tabelle 17.2.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Kruskal-Wallis-Test (Mitte) und zugehörige robuste Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für **Methoden/Fachdid.Fragen**

	Df	F value	Pr(>F)
group	3	6.10	0.0009
	78		

	Df	Chi Squ	Pr(>Chi)
group	3	64	8.3e-14

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 2			
Gruppe 3	0.0034	0.12	
Gruppe 4	3.1e-13	2.7e-05	0.12

Tabelle 17.3.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für **Grundideen/Konzepte**

	Df	F value	Pr(>F)
group	3	2.26	0.0885
	78		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach4	3	2.6	0.88	3.9	0.01216
Residuals	8e+01	18	0.23		

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 2	0.22		
Gruppe 3	0.18	0.033	
Gruppe 4	0.22	0.12	1

Tabelle 17.4.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für **Interpretationen**

	Df	F value	Pr(>F)
group	3	2.00	0.1209
	78		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach4	3	2.1	0.69	3	0.03646
Residuals	8e+01	18	0.23		

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 2	0.4		
Gruppe 3	0.2	0.16	
Gruppe 4	0.18	0.24	0.034

Tabelle 17.5.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für **Mathematischer Formalismus**

	Df	F value	Pr(>F)
group	3	1.02	0.3883
	78		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach4	3	3.4	1.1	8	0.0001055
Residuals	8e+01	11	0.14		

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 2	0.8		
Gruppe 3	0.00016	6.5e-05	
Gruppe 4	0.8	0.8	0.0021

18. Clusteranalyse Studenten Geeignete Schulinhalte

Tabelle 18.1.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Unbestimmtheit/Verschränkung/Messung**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	3.06	0.0844
	74		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach2	1	2.4	2.4	14	0.0004123
Residuals	7e+01	13	0.18		

Tabelle 18.2.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Spin/Drehimpuls**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	0.27	0.6026
	74		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach2	1	0.062	0.062	0.27	0.6026
Residuals	7e+01	17	0.23		

Tabelle 18.3.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und robuster t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Laser**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	16.14	0.0001
	74		

	Gruppe 1
Gruppe 2	1.6e-13

Tabelle 18.4.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Quantencomputer-/kryptographie**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	3.28	0.0742
	74		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach2	1	0.73	0.73	3.3	0.0742
Residuals	7e+01	16	0.22		

Tabelle 18.5.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und robuster t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Photo-/Comptoneffekt**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	10.86	0.0015
	74		

	Gruppe 1
Gruppe 2	0.002

Tabelle 18.6.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Schrödingergleichung**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	0.00	0.9556
	74		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach2	1	0.00045	0.00045	0.0031	0.9556
Residuals	7e+01	11	0.15		

Tabelle 18.7.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Welle-Teilchen-Dualismus**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	2.41	0.1252
	74		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach2	1	0.2	0.2	2.4	0.1252
Residuals	7e+01	6.2	0.083		

Tabelle 18.8.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und robuster t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Interferenz**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	4.10	0.0464
	74		

	Gruppe 1
Gruppe 2	0.048

Tabelle 18.9.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Potentiale**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	1.72	0.1933
	74		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach2	1	0.36	0.36	1.7	0.1933
Residuals	7e+01	15	0.21		

Tabelle 18.10.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Wellenfunktion**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	2.06	0.1550
	74		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach2	1	0.37	0.37	2.1	0.155
Residuals	7e+01	13	0.18		

Tabelle 18.11.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Strahlung**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	1.13	0.2910
	74		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach2	1	0.14	0.14	1.1	0.291
Residuals	7e+01	9.3	0.13		

Tabelle 18.12.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Quantenzahlen**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	2.37	0.1283
	74		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach2	1	0.41	0.41	1.7	0.1901
Residuals	7e+01	17	0.23		

Tabelle 18.13.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Messung**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	4.75	0.0421
	19		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach2	1	1.2	1.2	6.2	0.02217
Residuals	2e+01	3.7	0.2		

Tabelle 18.14.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Potentiale**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	1.97	0.1762
	19		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach2	1	0.3	0.3	2	0.1762
Residuals	2e+01	2.9	0.15		

Tabelle 18.15.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Wellenfunktion**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	0.54	0.4703
	19		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach2	1	1.1	1.1	4.9	0.03955
Residuals	2e+01	4.2	0.22		

Tabelle 18.16.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Strahlungsformeln**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	1.97	0.1762
	19		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach2	1	0.3	0.3	2	0.1762
Residuals	2e+01	2.9	0.15		

Tabelle 18.17.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Quantenzahlen**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	1.36	0.2585
	19		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach2	1	2.7	2.7	22	0.0001707
Residuals	2e+01	2.4	0.13		

19. Clusteranalyse Dozenten

Tabelle 19.1.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für **formal-analytische Kompetenzen**

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	2.26	0.1406
	14		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach3	2	2.90	1.45	15.24	0.0003
Residuals	14	1.33	0.10		

	Gruppe 1	Gruppe 2
Gruppe 2	0.10	
Gruppe 3	0.00	0.00

Tabelle 19.2.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Kruskal-Wallis-Test (Mitte) und zugehörige robuste Post-Hoc-Tests für Gruppenvergleich (unten) für **didaktische Methoden**

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	4.84	0.0253
	14		

	df	Chi Squ	Pr(>Chi)
group	2.00	4.87	0.09

	Gruppe 1	Gruppe 2
Gruppe 2	0.83	
Gruppe 3	0.14	0.14

Tabelle 19.3.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (unten) für **Erklärung von Konzepten**

	Df	F value	Pr(>F)
group	2		1
	14		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach3	2	0.00	0.00	0.91	0.4266
Residuals	14	0.00	0.00		

Tabelle 19.4.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (unten) für **Nennung von Beispielen/Anwendungen**

	Df	F value	Pr(>F)
group	2		1
	14		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach3	2	0.00	0.00	0.91	0.4266
Residuals	14	0.00	0.00		

Tabelle 19.5.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und robuste Post-Hoc-Tests für Gruppenvergleich (unten) für **Erläuterung von neuen Beispielen anhand quantenphysikalischer Prinzipien**

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	Inf	0.0000
	14		

	df	Chi Squ	Pr(>Chi)
group	2.00	10.33	0.01

	Gruppe 1	Gruppe 2
Gruppe 2	0.01	
Gruppe 3	0.14	0.14

20. Clusteranalyse Kompetenztypen

Tabelle 20.1.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Frage zu Erkenntnissen aus dem Interferenzexperiment**

	Df	F value	Pr(>F)
group	3	0.91	0.4520
	21		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach4	3	2.71	0.90	10.89	0.0002
Residuals	21	1.75	0.08		

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 2	0.004		
Gruppe 3	1	0.00079	
Gruppe 4	1	0.019	0.7

Tabelle 20.2.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Frage zu möglichen didaktischen Funktionen aus dem Interferenzexperiment**

	Df	F value	Pr(>F)
group	3	1.55	0.2307
	21		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach4	3	5.08	1.69	3.76	0.0263
Residuals	21	9.46	0.45		

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 2	0.79		
Gruppe 3	0.028	0.059	
Gruppe 4	0.88	0.88	0.11

Tabelle 20.3.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Frage zum Fachwissen 2**

	Df	F value	Pr(>F)
group	3	0.48	0.7018
	21		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach4	3	2.81	0.94	3.79	0.0258
Residuals	21	5.19	0.25		

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 2	0.043		
Gruppe 3	0.22	0.97	
Gruppe 4	0.97	0.22	0.51

Tabelle 20.4.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Frage zu Schülervorstellungen**

	Df	F value	Pr(>F)
group	3	2.64	0.0757
	21		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach4	3	23.04	7.68	4.79	0.0108
Residuals	21	33.70	1.60		

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 2	0.2		
Gruppe 3	0.0068	0.088	
Gruppe 4	0.2	0.74	0.2

Tabelle 20.5.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Frage zum Fachwissen 3**

	Df	F value	Pr(>F)
group	3	2.65	0.0752
	21		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach4	3	11.07	3.69	7.25	0.0016
Residuals	21	10.69	0.51		

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 2	0.2		
Gruppe 3	0.67	0.67	
Gruppe 4	0.2	0.0011	0.036

Tabelle 20.6.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Frage Wechsel vom Bohrschen zu einen differenzierten quantenmechanischen Atommodell**

	Df	F value	Pr(>F)
group	3	1.15	0.3531
	21		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach4	3	4.70	1.57	4.42	0.0147
Residuals	21	7.44	0.35		

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 2	0.074		
Gruppe 3	0.11	0.78	
Gruppe 4	0.011	0.28	0.5

21. Kompetenztypen

Tabelle 21.1.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für **Frage zum Wissen über quantenmechanischen Definitionen**

	Df	F value	Pr(>F)
group	3	0.35	0.7872
	14		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cluster.hierach4	3	1.53	0.51	1.62	0.2303
Residuals	14	4.41	0.32		

22. Zusammenhang zwischen der Änderung des Professionswissens und der Relevanz und Lehrbarkeit von Konzepten

Tabelle 22.1.: Zusammenhang zwischen der Veränderung der Fachwissens und Beurteilung der Lehrbarkeit quantenphysikalischer Konzepte

	1	2	3	4
1 Änderung Fachwissen	1.00	0.51	0.22	-0.09
2 Relevanz Unbestimmtheit	0.51	1.00	0.63	0.23
3 Relevanz Dualismus	0.22	0.63	1.00	-
4 Relevanz Verschränkung	-0.09	0.23	-	1.00

Tabelle 22.2.: Zusammenhang zwischen der Veränderung der Fachwissens und Beurteilung der Lehrbarkeit quantenphysikalischer Konzepte

	1	2	3	4
1 Änderung Fachwissen	1.00	0.21	0.15	0.27
2 Lehrbarkeit Unbestimmtheit	0.21	1.00	0.54	-
3 Lehrbarkeit Dualismus	0.15	0.54	1.00	0.56
4 Lehrbarkeit Verschränkung	0.27	-	0.56	1.00

Tabelle 22.3.: Zusammenhang zwischen der Veränderung der fachdidaktischen Wissens und Beurteilung der Lehrbarkeit quantenphysikalischer Konzepte

	1	2	3	4
1 Änderung Fachwissen	1.00	0.08	-0.02	-0.79
2 Relevanz Unbestimmtheit	0.08	1.00	0.63	0.23
3 Relevanz Dualismus	-0.02	0.63	1.00	-
4 Relevanz Verschränkung	-0.79	0.23	-	1.00

Tabelle 22.4.: Zusammenhang zwischen der Veränderung der fachdidaktischen Wissens und Beurteilung der Lehrbarkeit quantenphysikalischer Konzepte

	1	2	3	4
1 Änderung Fachwissen	1.00	-0.13	-0.07	-0.34
2 Lehrbarkeit Unbestimmtheit	-0.13	1.00	0.54	-
3 Lehrbarkeit Dualismus	-0.07	0.54	1.00	0.56
4 Lehrbarkeit Verschränkung	-0.34	-	0.56	1.00

23. Zusammenhang der Änderung von fachlichen und fachdidaktischem Wissen in der Versuchsgruppe

Tabelle 23.1.: Lineares Modell für die Änderung von fachlichen und fachdidaktischem Wissen in der Versuchsgruppe

	Änderung Fachwissen
Konstante	0.38 (0.48)
Änderung Fachdidaktikwissen	0.64** (0.20)
in Vergleichsgruppe	-1.58* (0.73)
Wechselwirkung	-0.76* (0.32)
R ²	0.55
Adj. R ²	0.47
Num. obs.	23
RMSE	1.54

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, $p < 0.1$

Tabelle 23.2.: Toleranz der Prädiktoren des Modells zur Prüfung der Multikollinearität

	Änderung Fachdidaktikwissen	Vergleichsgruppe	Wechselwirkung
Toleranz	0.54	0.86	0.60

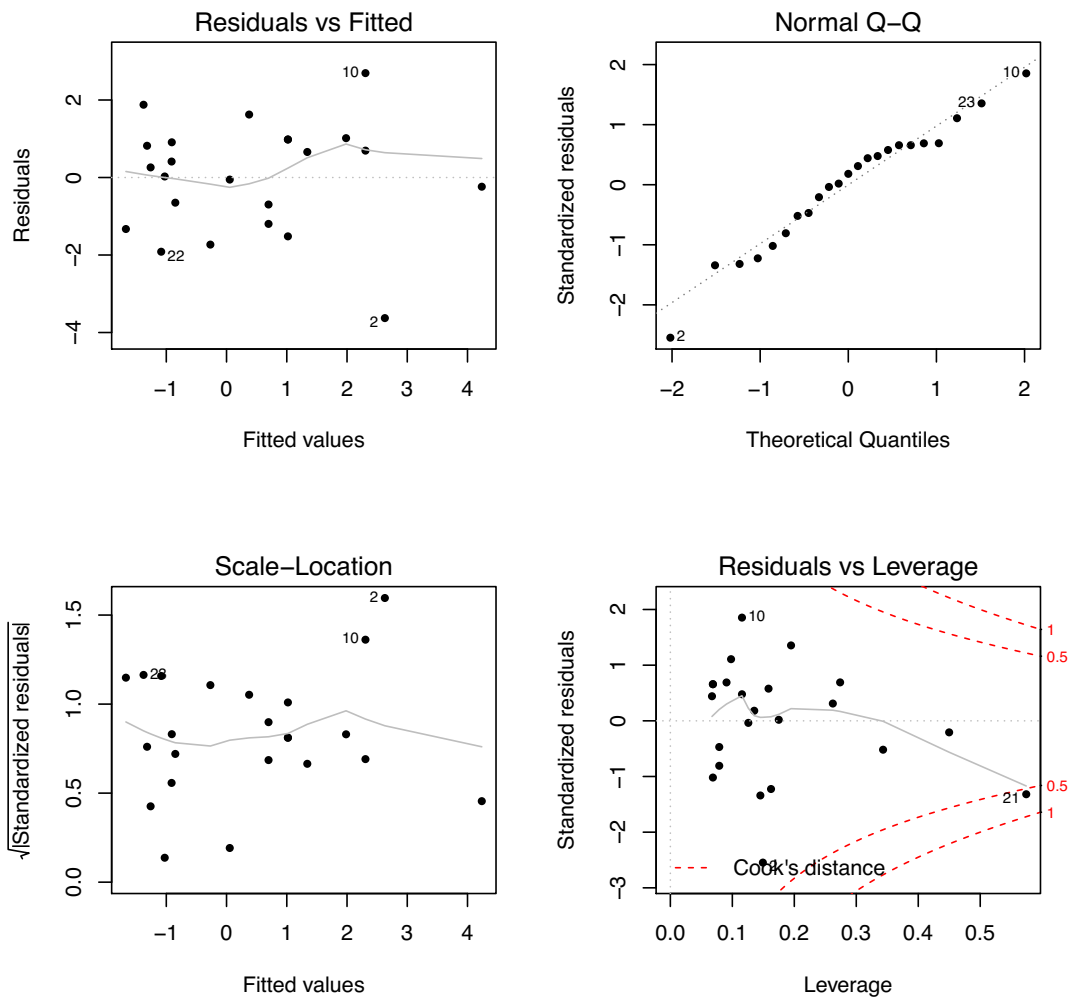


Abbildung 23.1.: Residuenplots des moderierten Regressionsmodells
 von l.o. nach r.u.:

1. Korrekte Modellspezifikation
2. Normalverteilung der Residuen
3. Homoskedastizität
- 4 Ausreißer

24. Gruppenvergleich der Ergebnisse des Professionswissentests

Tabelle 24.1.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben), Lilliefors-Test auf Normalverteilung (mitte) und exakter Wilcoxon-Rangsummentest für den Gruppenvergleich (unten) **Fachwissen Prä**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	0.04	0.8506
	20		

	Wert	Lilliefors-Stat.	p-Wert	Methode
Fachwissen Prä Versuch	0.16		0.56	Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test

	Wert	Lilliefors-Stat.	p-Wert	Methode
Fachwissen Prä Vergleich	0.2		0.31	Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ph	1	2.3	2.3	0.69	0.4172
Residuals	2e+01	66	3.3		

Tabelle 24.2.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben), Lilliefors-Test auf Normalverteilung (mitte) und exakter Wilcoxon-Rangsummentest für den Gruppenvergleich (unten) **Fachdidaktikwissen Prä**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	0.04	0.8506
	20		

	Wert Lilliefors-Stat.	p-Wert	Methode
Fachwissen Prä Versuch	0.2	0.04	Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test

	Wert Lilliefors-Stat.	p-Wert	Methode
Fachwissen Prä Vergleich	0.14	0.86	Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test

	W-Wert	p-Wert	Methode
Fachwissen Prä	62	0.13	Exact Wilcoxon rank sum test

Tabelle 24.3.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben), Lilliefors-Test auf Normalverteilung (mitte) und exakter Wilcoxon-Rangsummentest für den Gruppenvergleich (unten) **Fachwissen Post**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	0.41	0.5283
	17		

	Wert Lilliefors-Stat.	p-Wert	Methode
Fachwissen Post Versuch	0.16	0.62	Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test

	Wert Lilliefors-Stat.	p-Wert	Methode
Fachwissen Post Vergleich	0.19	0.5	Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ph	1	51	51	18	0.000523
Residuals	2e+01	48	2.8		

Tabelle 24.4.: Levene-Varianzhomogenitätstest (oben), Lilliefors-Test auf Normalverteilung (mitte) und exakter Wilcoxon-Rangsummentest für den Gruppenvergleich (unten) **Fachdidaktikwissen Post**

	Df	F value	Pr(>F)
group	1	1.13	0.2983
	22		

	Wert Lilliefors-Stat.	p-Wert	Methode
Fachwissen Post Versuch	0.17	0.26	Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test

	Wert Lilliefors-Stat.	p-Wert	Methode
Fachwissen Post Vergleich	0.2	0.38	Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ph	1	53	53	13	0.00142
Residuals	2e+01	88	4		

25. Vergleich der Ergebnisse des Prä- und Posttests Professionswissen

Tabelle 25.1.: t-Test für das Fachwissen Prä/Post in der Versuchsgruppe

	t	df	p-Wert	Schätzung	Methode	Alternative
Fachwissen Versuch	2.77	9	0.02	1.725	Paired t-test	two.sided

	t	df	p-Wert	Schätzung	Methode	Alternative
Fachwissen Versuch	2.77	9	0.01	1.725	Paired t-test	greater

Tabelle 25.2.: Exakter Wilcoxon-Rangsummen-Test für das fachdidaktische Wissen Prä/Post in der Versuchsgruppe

	V	p-Wert	Methode	Alternative
Fachdidaktikwissen Versuch	88.5	0.02	Exact Wilcoxon signed rank test	two.sided

	V	p-Wert	Methode	Alternative
Fachdidaktikwissen Versuch	88.5	0.01	Exact Wilcoxon signed rank test	greater

Tabelle 25.3.: t-Test für das Fachwissen Prä/Post in der Vergleichssgruppe

	t	df	p-Wert	Schätzung	Methode	Alternative
Fachwissen Vergleich	-2.65	7	0.03	-1	Paired t-test	two.sided

	t	df	p-Wert	Schätzung	Methode	Alternative
Fachwissen Vergleich	-2.65	7	0.02	-1	Paired t-test	less

Tabelle 25.4.: t-Test für das Fachdidaktikwissen Prä/Post in der Vergleichssgruppe

	t	df	p-Wert	Schätzung	Methode	Alternative
Fachdidaktikwissen Vergleich	-0.15	7	0.88	-0.125	Paired t-test	two.sided

26. Lineares Zusammenhangsmodell zwischen fachlichen und fachdidaktischen Wissen

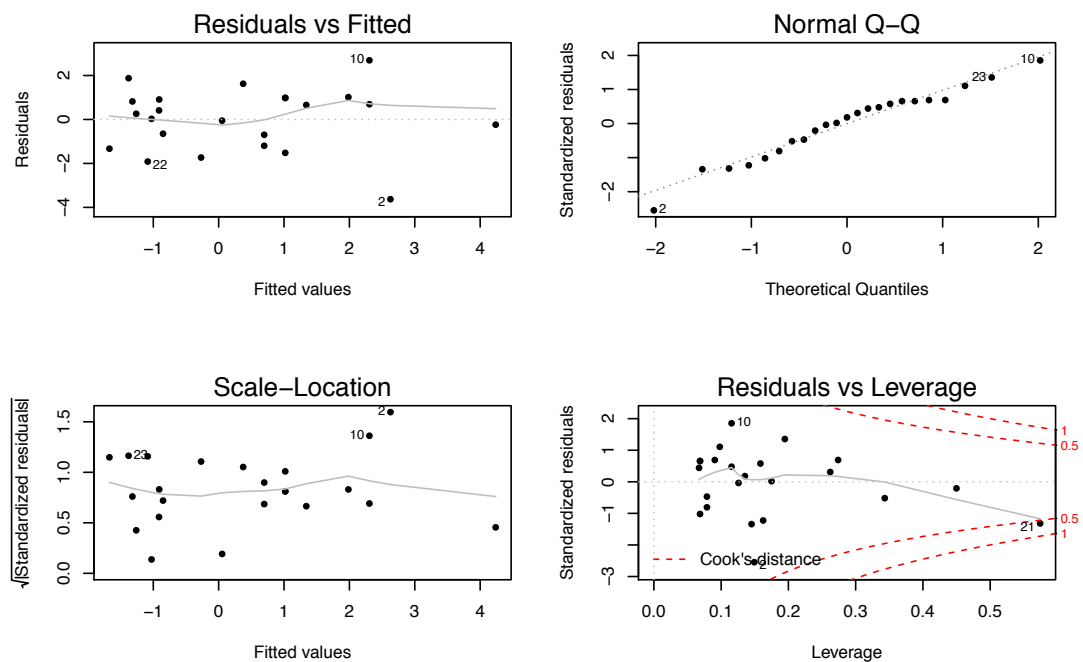


Abbildung 26.1.: Residuenplots des moderierten Regressionsmodells Fachwissen
von links oben nach rechts unten:

1. Korrekte Modellspezifikation
2. Normalverteilung der Residuen
3. Homoskedastizität
4. Ausreißer

Die einzelnen Analysen zeigen eine gute Regression hinsichtlich der Vorgaben, nur der Datenpunkt 21 entpuppt sich als Ausreißer, allerdings mit noch nicht zu großem Einfluss (Cooks-Distanz < 1).

27. Regressionsmodelle fachlichen und fachdidaktischen Wissens

F-Tests für die Modellreduzierung

Details in 12.3

Tabelle 27.1.: F-Test für die Vereinfachung Fachwissen: Ausgangsmodell → Reduziertes Modell 1a

	Res.Df	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)
1	15	41.58				
2	17	48.22	-2	-6.64	1.20	0.3294

Tabelle 27.2.: F-Test für die Vereinfachung Fachwissen: Ausgangsmodell → Reduziertes Modell 1b

	Res.Df	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)
1	15	41.58				
2	18	48.06	-3	-6.47	0.78	0.5242

Tabelle 27.3.: F-Test für die Vereinfachung Fachwissen: Reduziertes Modell 1b → Reduziertes Modell 2

	Res.Df	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)
1	18	48.06				
2	19	50.23	-1	-2.17	0.81	0.3792

Tabelle 27.4.: F-Test für die Vereinfachung Fachwissen: Reduziertes Modell 2 \rightarrow Reduziertes Modell 3

	Res.Df	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)
1	19	50.23				
2	20	50.23	-1	-0.00	0.00	0.9936

Tabelle 27.5.: F-Test für die Vereinfachung Fachwissen: Reduziertes Modell 3 \rightarrow Reduziertes Modell 4a

	Res.Df	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)
1	20	50.23				
2	21	84.93	-1	-34.70	13.82	0.0014

Tabelle 27.6.: F-Test für die Vereinfachung Fachwissen: Reduziertes Modell 3 \rightarrow Reduziertes Modell 4b

	Res.Df	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)
1	20	50.23				
2	21	69.40	-1	-19.18	7.64	0.0120

Tabelle 27.7.: F-Test für die Vereinfachung Fachdidaktikwissen: Ausgangsmodell \rightarrow Reduziertes Modell 1a

	Res.Df	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)
1	15	46.90				
2	17	58.33	-2	-11.42	1.83	0.1950

Tabelle 27.8.: F-Test für die Vereinfachung Fachdidaktikwissen: Ausgangsmodell \rightarrow Reduziertes Modell 1b

	Res.Df	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)
1	15	46.90				
2	18	63.00	-3	-16.10	1.72	0.2064

Tabelle 27.9.: F-Test für die Vereinfachung Fachdidaktikwissen: Reduziertes Modell 1b \rightarrow Reduziertes Modell 2

	Res.Df	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)
1	18	63.00				
2	19	68.52	-1	-5.52	1.58	0.2254

Tabelle 27.10.: F-Test für die Vereinfachung Fachdidaktikwissen: Reduziertes Modell 2 → Reduziertes Modell 3

	Res.Df	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)
1	19	68.52				
2	20	69.87	-1	-1.35	0.37	0.5479

Tabelle 27.11.: F-Test für die Vereinfachung Fachdidaktikwissen: Reduziertes Modell 3 → Reduziertes Modell 4a

	Res.Df	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)
1	20	69.87				
2	21	96.16	-1	-26.30	7.53	0.0125

Tabelle 27.12.: F-Test für die Vereinfachung Fachdidaktikwissen: Reduziertes Modell 3 → Reduziertes Modell 4b

	Res.Df	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)
1	20	69.87				
2	21	94.71	-1	-24.84	7.11	0.0148

28. Verwendete Pakete und Optionen in R

```
opts_knit$set(self.contained=FALSE)
options(scipen = 0, digits = 2)
library("psych")
library("xtable")
library("car")
library("cluster")
library("rockchalk")
library("irr")
library("nortest")
library("exactRankTests")
library("MBESS")
library("pwr")
library("texreg")
library("ggplot2")
library("grid")
library("gridExtra")
library("eeptools")
library("lsr")
library("Hmisc")
```


29. Zeitplanung des fachdidaktischen Zusatzseminars

Fachdidaktik Quantenphysik

Einleitung 15.10.

- Fragebogen und Concept Map
- Ziele der Lehrveranstaltung
- Schulrelevanz

Fachlich-Fachdidaktischer Input

Thema 1 Grundideen der Quantentheorie im Doppelspaltversuch 22.10. & 29.10.

- Doppelspaltversuch/Taylor-Experiment
- Mach-Zehnder-Interferometer
- Phänomenologische Beschreibung des Spins
- Dirac-Notation
- Superposition
- Einführung in die Problematik des Messprozesses
- Schülervorstellungen zum Doppelspalt
- Didaktische Rekonstruktion

Thema 2 Grundidee Unbestimmtheit 05.11. & 12.11.

- Definition und Modellexperimente zur Unbestimmtheit: Quantenradierer
- Unbestimmtheit im Zusammenhang mit dem Messprozess
- Interpretationsprobleme
- Theoretische Beschreibung des Spins
- Wie lässt sich Unbestimmtheit/Komplementarität durch Bilder und Analogien für den Schüler visualisieren?
- Kryptografie mit One-Time-Pad (BB84)

Thema 3 Grundidee Verschränkung 19.11. & 26.11.

- EPR-Experiment
- Bellsche Ungleichung
- Interpretationsprobleme
- Diskussion: Ist Verschränkung eine Grundeigenschaft, die in der Schule vermittelt werden sollte?
- GHZ-Spiel, Visualisierung Verschränkung (nach Heusler)
- Kryptografie mit Zweiphotonensystemen (Ekert 91)
- Vergleich zweier Lehrgänge zur Verschränkung
- Schrödingers Katze
- Teleportation

Unterrichtskonzepte

Thema 4 Diskussion verschiedener Unterrichtskonzepte & Schülerschwierigkeiten 3.12

- Lehrkonzepte
 - Milq
 - ETH-Zürich
 - Dirac-Konzept
- Schülerschwierigkeiten:
 - Was macht die Quantenphysik für Schüler schwierig?
 - Was macht Quantenphysik für Lehrer schwierig?
 - Bewertung von Schülerantworten/-fragen
 - Einschätzen von Lernschwierigkeiten
 - Überprüfung des Schülerverständnisses
 - Adäquate Reaktion in kritischen Unterrichtsszenen
- Medien für den Quantenphysikunterricht
 - Wie lassen sich Lehrbücher,
 - Simulationen,
 - Arbeitsblätter und
 - Lehr-DVDs (z.B. "Quantendimensionen" von Heusler) sinnvoll einsetzen?

Praktische Umsetzung

Thema 5 Entwicklung eines eigenen Unterrichtsganges und Unterrichtsstunden 10./17.12. & 7.1

- Eigener Unterrichtsgang Quantenphysik (Gruppenarbeit)
- Stundenentwicklung zum eigenen Unterrichtsgang (Einzelarbeit, Selbststudium)
- Präsentation 14.1. & 21.1. (Prüfungsleistung)

Reflektion, Schluss-Fragebogen 28.1.

30. Arbeitsblätter des fachdidaktischen Zusatzseminars

Aufgabe Mach-Zehnder-Interferometer

Führen Sie eine didaktische Rekonstruktion von Experimenten mit dem Mach-Zehnder-Interferometer durch. Konzentrieren Sie sich dafür auf die Sachanalyse, vor allem der Grundidee und der Schülerperspektive. Eine detaillierte methodische Umsetzung ist nicht notwendig.

Lassen Sie sich u.a. von folgenden Fragen leiten:

- Welche didaktische Funktionen hat dieses Experiment?
- Welche Lernvoraussetzungen sollten die Schüler haben?
- Welche Lernziele können erreicht werden?
- Wie könnten die Stunden in einem Unterrichtsgang eingebettet werden?
- Welche Lehr-/Lernformen sind für die Vermittlung günstig?
- Suchen Sie Material zum Thema, beispielsweise Lehrbücher, Simulationen, Arbeitsblätter, Lehr-DVDs(z.B. Quantendimensionen von Heusler).

Literatur

- Pereira erläutert, warum sich das virtuelle Mach-Zehnder-Interferometer als Lehrinstrument eignet: Pereira **On the use of a virtual Mach-Zehnder interferometer in the teaching of quantum mechanics** [OL]
- Eine umfassende mathematische Darstellung zum Mach-Zehnder-Interferometer finden Sie bei: Berthold-Georg Englert **Remarks on some basic issues in quantum mechanics** [OL]
- Eine genaue Beschreibung des Mach-Zehnder-Interferometers und seine didaktische Anwendung erhalten Sie in: Müller **Photonen im Mach-Zehnder-Interferometer – ein Zugang zur Deutung der Quantenphysik** [OL]

Ergänzende Literatur

- Eine gute allgemeine Einführung in die Fachdidaktik gibt: Martin Hopf/Horst Schecker/ Hartmut Wiesner **Physikdidaktik kompakt** Aulis Verlag 2011 [HA]
- Eine umfassende Darstellung der Quantenphysik finden Sie im Lehrgang des Münchner Unterrichtskonzepts zur Quantenmechanik (**Milq**) von Rainer Müller und Hartmut Wiesner [OL]
- Die Welcher-Weg-Information im Zusammenhang zur Polarisierung als ein Beispiel für einen Zweizustand wird erläutert in: Feynman **Vorlesungen über Physik 3**, 221 Polarisierung als Zweizustand, Oldenburg Wissenschaftsverlag 2006
- Zur Präparation, zum Bahnbegriff und den beiden Experimenten finden Sie Informationen in: Franz Kranzinger **Impulse Physik Quantenphysik** Klett-Verlag 2002 [HA]
- Eine Begründung, warum ein Zugang über die Optik besonders gut für die Vermittlung von Quantenmechanik geeignet ist, finden Sie in: Jan Meyn **Erlangener Konzept** [OL]

[HA] Ein Exemplar können Sie bei uns im Handapparat erhalten.

[OL] Diese Artikel finden Sie im Ordner „Literatur“ im Opal-Kurs.

Aufgabe Unbestimmtheit

Beantworten Sie bitte folgende Fragen und laden Sie ihre Lösungen in den Ordner "Abgabe" im Opal-Lernkurs hoch!

- Formulieren Sie auf der Grundlage der Diskussion in der letzten Stunde eine Charakterisierung der Unbestimmtheit für Schüler!
- Welche Lernziele können erreicht werden?
- Welche Lehr-/Lernformen sind für die Vermittlung günstig?
- Überlegen Sie sich eine Analogie um den Begriff der Unbestimmtheit Schülern zu erklären!
- Suchen Sie Material zum Thema, beispielsweise Lehrbücher, Simulationen, Arbeitsblätter, Lehr-DVDs (z.B. Quantendimensionen von Heusler).

Literatur/Medien

- Eine umfassende Darstellung der Quantenphysik finden Sie im Lehrgang des Münchner Unterrichtskonzepts zur Quantenmechanik (**Milq**) von Rainer Müller und Hartmut Wiesner, Kapitel 7 ist vor allem für die Unbestimmtheit interessant. [OL]
- Über die Unbestimmtheit informiert Kapitel 1.8 in: Feynman **Vorlesungen über Physik 3**, 221 Polarisierung als Zweizustand, Oldenburg Wissenschaftsverlag 2006 [HA]
- Eine Möglichkeit zur Behandlung der Unbestimmtheit finden Sie im Leitprogramm der ETH Zürich **Es spukt also doch bei den Quanten** [OL]
- Hinweise zur Behandlung der Unbestimmtheit, vor allem des Spins, mit Hilfe von Kalkspatexperimenten erhalten Sie in Gesche Pospiech **Lehrgang zur Quantenphysik** und **Uncertainty and complementarity: the heart of quantum physics** [OL]
- Über die Behandlung im Unterricht informieren diese beiden Artikel von Rainer Müller **Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation im Unterricht** und **Die Energie-Zeit-Unbestimmtheitsrelation – Geltung, Interpretation und Behandlung im Schulunterricht** [OL]

Ergänzende Literatur

- Aufgabenbeispiele zur Unbestimmtheit sind in Kapitel 6 des Buches: Franz Kranzinger **ImpulsePhysik Quantenphysik** Klett-Verlag 2002 zu finden [HA]
- Eine gute allgemeine Einführung in die Fachdidaktik gibt: Martin Hopf/Horst Schecker/ Hartmut Wiesner **Physikdidaktik kompakt** Aulis Verlag 2011 [HA]
- Ein Beispiel für eine anspruchsvolle, multimediale Umsetzung des Themas finden auf der DVD von Stefan Heusler **Quantendimensionen** [ISO-Datei am Lehrstuhl erhältlich]
- Zur Interpretation der Unbestimmtheit berät Rainer Müller/Hartmut Wiesner **Die Interpretation der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation** [OL]

Bedeutung der Bohrschen Postulate

Nennen Sie, welche Schülerschwierigkeiten sich bei der Vermittlung der Bohrschen Postulate ergeben können!

Argumentieren, wie Sie ihren eigenen Unterricht gestalten würden:

- Die Bohrschen Postulate trotz Schwierigkeiten übernehmen.
- Erweiterung/Modifizierung des Modells
- Postulate nicht behandeln und durch anderen Atomvorstellungen ersetzen.

Literatur

- Kagan/Perkins/Wiemann **Why we should teach the Bohr model and how to teach it effectively**, Physical Review Special Topics - Physics Education Research **4**, 010103 (2008) [OL]
- Küblbeck **Ein Unterrichtsvorschlag zur Beschreibung von Energieniveaus und Orbitalen mit einem zeitgemäßen Atommodell**, MNU 55/1 (Jan. 2002), S. 7. [OL]

Ergänzende Literatur

- Müller/Wiesner **Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik** S.106-109 [OL]
- Müller **Qualitative Quantenphysik** S. 13-14 [OL]

[HA] Ein Exemplar können Sie bei uns im Handapparat erhalten.

[OL] Diese Artikel finden Sie im Ordner „Literatur“ im Opal-Kurs.

31. Dozentenfragebogen

Dozenten Quantenphysikausbildung von Lehramtsstudenten

Mit dieser Umfrage soll herausgefunden werden, wie Dozenten, welche mit der Ausbildung von zukünftigen Lehrern im Bereich Quantenphysik betraut sind, die Lehre einschätzen, wo sie Verbesserungsbedarf und -möglichkeiten sehen.

Herzlich Willkommen zur Umfrage "Quantenphysik im Lehramtsstudium". Vielen Dank, dass Sie sich kurz Zeit nehmen unsere Fragen zu beantworten.

Sie tragen dazu bei die Ausbildung von Physiklehrern zu verbessern.

Es würde uns außerdem sehr freuen, wenn Sie in Ihrer Veranstaltung zur Quantenphysik auf unsere Umfrage für Lehramtsstudenten

bit.ly/quanten

verweisen könnten. Unter allen teilnehmenden Studenten werden Amazon-Gutscheine verlost.

Vielen Dank und Grüße

Matthias Schöne

Fachdidaktik der Physik, TU Dresden

Diese Umfrage enthält 13 Fragen.

Art der Lehrveranstaltung

Was für eine Quantenphysikveranstaltung für Lehramtsstudenten haben Sie gehalten?

*

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ Vorlesung
- ☐ Übung
- ☐ Seminar
- ☐ Andere Form, bitte genauer angeben:

Bitte schreiben Sie einen Kommentar zu Ihrer Auswahl

Ist diese innerhalb des Lehramtstudiums verpflichtend?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ ja verpflichtend
☐ nein freiwillig

Wie oft haben Sie diese schon gehalten?

*

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ 1
☐ 2
☐ 3
☐ 4
☐ 5

Wie gestalten Sie ihre Lehrveranstaltung?

Kommentieren wenn eine Antwort gewählt wird

Bitte wählen Sie die zutreffenden Punkte aus und schreiben Sie einen Kommentar dazu:

- ☐ Vorrechnenübungen, Referate;
überwiegend Studenten aktiv
- ☐ in Seminarform mit Diskussionen,
Lehrer und Lerner gleichermaßen aktiv
- ☐ eher im vorlesenden Stil, bei
Übungen z.B. durch Vorrechnen, starke
Aktivität des Dozenten

Ziele und Themen der Lehrveranstaltung

Was sind die Ziele ihrer Lehrveranstaltung?

Welche für Lehramtsstudenten wesentliche Themen der Quantenphysik werden behandelt?

*

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Was sollen Lehramtsstudenten aus ihrer Lehrveranstaltung mitnehmen?

Was brauchen Lehramtskandidaten, um an den Schulen ein realistisches Bild der modernen Quantenphysik vermitteln zu können?

*

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Gibt es Hindernisse für die Umsetzung ihrer Lehrziele?

*

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

--

Welche Kompetenzen vermittelt ihre Lehrveranstaltung hauptsächlich?

Der Student kann:

*

Kommentieren wenn eine Antwort gewählt wird

Bitte wählen Sie die zutreffenden Punkte aus und schreiben Sie einen Kommentar dazu:

<input type="checkbox"/> formale Rechnungen durchführen	<table border="1"><tr><td></td></tr></table>	
<input type="checkbox"/> methodisch-didaktische Konzeptionen nennen	<table border="1"><tr><td></td></tr></table>	
<input type="checkbox"/> die wesentlichen Konzepte der Quantenphysik erklären	<table border="1"><tr><td></td></tr></table>	
<input type="checkbox"/> wichtige Beispiele der Quantenphysik nennen	<table border="1"><tr><td></td></tr></table>	
<input type="checkbox"/> kann neue Beispiele mittels grundlegender quantenphysikalischer Prinzipien erläutern	<table border="1"><tr><td></td></tr></table>	
<input type="checkbox"/> kann mathematische Analyse quantenphysikalischer Fragestellungen geben	<table border="1"><tr><td></td></tr></table>	

Wesentlichen Konzepte der Quantenphysik

Was sind ihrer Meinung nach die grundlegenden Konzepte der Quantenphysik?

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Ausbildung von Lehramtsstudenten

Setzen Sie Schwerpunkte in ihrer Vorlesung/Übung für Lehrer anders als für Fachphysiker?

Wenn ja, wie und warum?

*

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ ja
☐ nein

Bitte schreiben Sie einen Kommentar zu Ihrer Auswahl

Halten Sie den Umfang der Quantenphysikausbildung für angehende Lehrer für

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ zu gering
- ☐ ausreichend
- ☐ zu groß

Bitte schreiben Sie einen Kommentar zu Ihrer Auswahl

Genügen die Vorkenntnisse, die die Lehramtsstudenten mitbringen, für ihre Lehrveranstaltung?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ ja
- ☐ nein

Wenn nein, wo liegen die Schwächen der Studenten?

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

32. Studentenfragebogen

Umfrage zur Quantenphysik-extern

Mit dieser Umfrage soll herausgefunden werden, ob Lehramtsstudenten mit ihrer Ausbildung im Bereich Quantenphysik zufrieden sind, wo Verbesserungsbedarf besteht und wie Verbesserungen aussehen könnten.

Herzlich Willkommen zur Umfrage "Quantenphysik im Lehramtsstudium". Vielen Dank, dass Sie sich kurz Zeit nehmen unsere Fragen zu beantworten.

Sie tragen dazu bei die Ausbildung von Physiklehrern zu verbessern.

Unter allen Teilnehmern werden fünf Amazongutscheine verlost. Möchten Sie an der Verlosung teilnehmen, geben Sie bitte Ihre Email-Adresse am Ende des Fragebogens ein. Die eingegebenen Daten und die E-Mail-Adresse werden nachher getrennt, so dass ihre Antworten vollkommen anonym sind.

Diese Umfrage enthält 15 Fragen.

Fragen

Alle Fragen beziehen sich auf die gesamte Quantenphysikausbildung (Experimentalphysik, Theoretische Physik, Fachdidaktik, Spezialvorlesungen)

Was sind die wesentlichen Inhalte des von Ihnen besuchten Quantenphysikkurses? *

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- ☐ Diracformalismus (bra-ket-Schreibweise)
- ☐ Schrödingergleichung
- ☐ Mathematischer Formalismus (Operator, Zustand, Wellenfunktion,...)
- ☐ Geschichte der Quantenphysik
- ☐ Comptoneffekt
- ☐ Photoeffekt
- ☐ Schrödinger-/Heisenbergbild
- ☐ Zeitentwicklung/Hamiltonoperator
- ☐ Wasserstoffmodell
- ☐ Quantenzahlen/Hundtsche Regeln
- ☐ Potentiale
- ☐ Drehimpuls
- ☐ Spin
- ☐ Sonstiges:

Folgende Kompetenzen werden vermittelt: *

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	stimmt gar nicht	stimmt wenig	stimmt teils- teils	stimmt ziemlich	stimmt völlig
Fachliche Kompetenz	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fachdidaktische Kompetenz	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Methodische Kompetenz	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Anleitung zum praktischen Unterrichten	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Stellen Sie sich bitte vor, es würde einen Kurs zusätzlich zu der Vorlesung und Übung der Quantenphysik speziell für Lehramtsstudenten geben. Welche Dinge sollten in einem solchen Kurs behandelt werden? *

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- ☐ Unterrichtspraktische Methoden
- ☐ Anwendungsbeispiele
- ☐ Fachdidaktische Fragestellungen (Schülervorverständnis, phy. Modellbildung)
- ☐ Grundideen/fachliche Konzepte
- ☐ Interpretationsfragen
- ☐ Mathematischer Formalismus
- ☐ Sonstiges:

Fühlen Sie sich fachlich dem Themengebiet Quantenphysik gewachsen? *

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ ja
☐ nein

Bitte schreiben Sie einen Kommentar zu Ihrer Auswahl

Konzeptionelle Ideen zur Planung eines Unterrichtsganges im Themengebiet „Quantenphysik“ sollten in der Hochschulausbildung besprochen werden. *

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	stimmt gar nicht	stimmt wenig	stimmt teils- teils	stimmt ziemlich	stimmt völlig
konzeptionelle Ideen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Die fachliche Ausbildung genügt, um Quantenphysik realitätsnah und aktuell in der Schule vermitteln zu können. *

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ stimmt gar nicht
- ☐ stimmt wenig
- ☐ stimmt teils-teils
- ☐ stimmt ziemlich
- ☐ stimmt völlig

Bitte schreiben Sie einen Kommentar zu Ihrer Auswahl

Bitte kurze Begründung in das Kommentarfeld eintragen.

Die Vermittlung der historischen Entwicklung hin zur modernen Quantenphysik ist als Unterrichtsthema relevant. *

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ stimmt gar nicht
- ☐ stimmt wenig
- ☐ stimmt teils-teils
- ☐ stimmt ziemlich
- ☐ stimmt völlig

Bitte schreiben Sie einen Kommentar zu Ihrer Auswahl

Bitte mit kurzer Begründung im Kommentarfeld

Die Vermittlung philosophischer Aspekte der Quantenphysik ist als Unterrichtsthema relevant. *

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ stimmt gar nicht
- ☐ stimmt wenig
- ☐ stimmt teils-teils
- ☐ stimmt ziemlich
- ☐ stimmt völlig

Bitte schreiben Sie einen Kommentar zu Ihrer Auswahl

Bitte mit kurzer Begründung im Kommentarfeld

Ein zusätzlicher Kurs sollte Sie in mathematischen Fragen unterstützen.

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ stimmt gar nicht
- ☐ stimmt wenig
- ☐ stimmt teils-teils
- ☐ stimmt ziemlich
- ☐ stimmt völlig

Bitte schreiben Sie einen Kommentar zu Ihrer Auswahl

Bitte mit kurzer Begründung im Kommentarfeld

Die Logik hinter den Formeln wird ausreichend geklärt.

*

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ☐ stimmt gar nicht
- ☐ stimmt wenig
- ☐ stimmt teils-teils
- ☐ stimmt ziemlich
- ☐ stimmt völlig

Bitte schreiben Sie einen Kommentar zu Ihrer Auswahl

Bitte mit kurzer Begründung im Kommentarfeld

Die Grundkonzepte der Quantenphysik werden innerhalb der Ausbildung deutlich.

*

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	stimmt gar nicht	stimmt wenig	stimmt teils-teils	stimmt ziemlich	stimmt völlig
allgemein	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
deterministische Wellenfunktion- indeterministische	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Messung/Kollaps	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fähigkeit zur Interferenz	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Statistisches Verhalten	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Verschränkung/Nichtlokalität	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Unbestimmtheit/Komplementarität	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

33. Fragebogen zur Evaluation des Seminars

Eingangsfragebogen12/13

Willkommen!

Vielen Dank, dass Sie sich bereit erklärt haben am Eingangsfragebogen teilzunehmen.
Der Test ist anonym und dient dazu die Wirksamkeit der Lehrveranstaltung zu überprüfen.
Mit ihrer Hilfe kann das Lehrangebot verbessert werden.

Diese Umfrage enthält 23 Fragen.

Experiment

[] Geben Sie kurz die für Sie wichtigsten Erkenntnisse aus dem Doppelspaltexperiment an.

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

[] Welche didaktische Funktionen kann das Doppelspalt-Experiment haben? (Stichpunkte genügen)

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Fachfragen 1

[] Klicken Sie bitte jeweils die Option an, die ihrer Meinung nach zutrifft.

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	trifft zu	trifft nicht zu	weiß nicht
Im Doppelspaltexperiment verhält sich das Elektron hauptsächlich wie eine Welle.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Wenn das Elektron durch das Doppelspaltexperiment zum Schirm fliegt, nimmt es einen ganz bestimmten Weg, auch wenn ich ihn nicht bestimmen kann.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die augenblickliche Position eines Elektrons zwischen Quelle und Schirm ist prinzipiell unbestimmt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Im Doppelspaltexperiment verhält sich das Elektron weder genau wie ein Teilchen oder genau wie eine Welle. Es ist keines von beiden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Wenn man die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation kennt, haftet dem Welle-Teilchen-Dualismus nichts Geheimnisvolles mehr an.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Niemand kann beim Doppelspaltexperiment mit Sicherheit vorhersagen, an welcher Stelle man das nächste Elektron auf dem Schirm finden wird.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Fachdidaktische Fragen 1

[]

In ihrem Unterricht zur Quantenphysik werden werden verschiedene Schülervorstellungen deutlich. Warum ist es wichtig an diese anzuknüpfen und den Unterrichts darauf aufbauend zu planen?

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

[]

Der Lehrer führt mit Hilfe des Doppelspaltexperimentes mit zwei Polarisationsfolien (Quantenradierer) die Nichtlokalisierbarkeit von Quantenobjekten ein. In der darauf folgenden Übungsstunde diskutieren die Schüler über den Ort von Quantenobjekten sehr unterschiedlich:

Schüler A: Kleine Teilchen sind einfach zu schnell, deshalb kann man sie nicht exakt messen.

Schüler B: Der Ort von Quantenteilchen ist unwichtig, viel wichtiger ist die Masse, z.B. beim Stoß zweier Teilchen.

Schüler C: Nein, ein Quantenobjekt hat Teilchen- und Welleneigenschaften. Das Teilchen ist an genau einem Ort, aber von einer Welle umgeben, die für Interferenz sorgt.

Schüler D: Das stimmt aber nur für Atome, Licht hat keine Ortseigenschaft, sondern ist eine Welle im Raum.

Schüler E: Das ist ja viel zu kompliziert. Es ist doch eher wie in der Wärmelehre. Die Teilchen haben Ort und Geschwindigkeit, weil es aber so viele sind, ist der Ort und die Geschwindigkeit des einzelnen Teilchens nicht bekannt.

1. In den Aussagen der Schülerinnen und Schüler werden einige typische, fachlich nicht korrekte Vorstellungen deutlich. Welche können Sie jeweils bei den Schülerinnen und Schülern entdecken?

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

[]

Der Lehrer führt mit Hilfe des Doppelspaltexperimentes mit zwei Polarisationsfolien (Quantenradierer) die Nichtlokalisierbarkeit von Quantenobjekten ein. In der darauf folgenden Übungsstunde diskutieren die Schüler über den Ort von Quantenobjekten sehr unterschiedlich.

Schüler A: Kleine Teilchen sind einfach zu schnell, deshalb kann man sie nicht exakt messen.

Schüler B: Der Ort von Quantenteilchen ist unwichtig, viel wichtiger ist die Masse, z.B. beim Stoß zweier Teilchen.

Schüler C: Nein, ein Quantenobjekt hat Teilchen- und Welleneigenschaften. Das Teilchen ist an genau einem Ort, aber von einer Welle umgeben, die für Interferenz sorgt.

Schüler D: Das stimmt aber nur für Atome, Licht hat keine Ortseigenschaft, sondern ist eine Welle im Raum.

Schüler E: Das ist ja viel zu kompliziert. Es ist doch eher wie in der Wärmelehre. Die Teilchen haben Ort und Geschwindigkeit, weil es aber so viele sind, ist der Ort und die Geschwindigkeit des einzelnen Teilchens nicht bekannt.

1. Was hätte der Lehrer vor dem Experiment tun können, um den Konzeptwechsel zu vereinfachen?

2. Wie könnte das weitere Vorgehen des Lehrers aussehen, um allen Schülern eine quantenphysikalische Sichtweise näherzubringen?

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Fachdidaktische Fragen 2

[]

Würden Sie bei der Einführung der Quantenphysik historisch-genetisch, z.B. über die Entdeckung des Photoeffekts, Frank-Hertz-Versuch, ... vorgehen oder direkt moderne Quantenphysik auf einfachem Niveau vermitteln?

Begründen Sie!

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

[] Nennen Sie didaktische Mittel, um Schülern den Übergang vom Bohrschen Atommodell zu einem differenzierten Quantenmechanischen Modell zu erleichtern.

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Fachfragen 2

[] Klicken Sie bitte jeweils die Option an, die ihrer Meinung nach zutrifft.

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	trifft zu	trifft nicht zu	weiß nicht
Man kann einem Quantenobjekt eine bestimmte Eigenschaft zuschreiben, wenn man es auf diese Eigenschaft präpariert hat.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Begriffe "Präparation" und "Eigenschaft" erleichtern das Reden über Quantenobjekte.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Präparation bestimmt die Wellenfunktion der Elektronen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
In der Quantenmechanik ist es möglich, dass ein Quantenobjekt klassisch wohldefinierte Eigenschaften wie Ort und Energie nicht besitzt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bei ausreichend genauer Kenntnis der Anfangsbedingungen könnte man vorhersagen, wo ein bestimmtes Elektron auf dem Schirm landet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Fachdidaktische Fragen 3

Erklären Sie bitte kurz folgende Konzepte und schätzen Sie deren Relevanz und Lehrbarkeit in der Schule ein. Begründen Sie ihre Antwort!

[] Unbestimmtheit

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

34. Kategorisierung qualitativer Inhalte der Anforderungsanalyse

Gibt es Hindernisse für die Umsetzung ihrer Lehrziele?

Kategorienbildung im Split-Half-Design		Definition
mangelnde intellektuelle Fähigkeiten	intellektuelle	Die Studenten besitzen zu geringe, nicht durch Ausbildung veränderbare kognitive Fähigkeiten.
fehlende Mathematikkenntnisse		Die Studenten haben zu wenig für die Quantenphysik notwendige Mathematikkenntnisse erworben.
Zeitdruck		Es ist zu wenig Zeit für die geplanten Inhalte vorhanden.
unpassende Lehrmedien		Es gibt keine oder nur ungeeignete Medien, insbesondere Lehrbücher, für die Ausbildung der Lehramtsstudenten.

Was sind ihrer Meinung nach die grundlegenden Konzepte der Quantenphysik?

Kategorienbildung im Split-Half-Design	Definition
Formalismus	Beschreibung des grundlegenden Formalismus: Zustand eines Systems über die Wellenfunktion , ev. in bra-ket -Schreibweise, deren deterministische Entwicklung über Schrödingergleichung und der Observablen über hermitesche Operatoren
Interferenz	Interferenz von Wellenfunktionen durch Superposition
statistisches Verhalten	Der Ausgang einer Messung ist ontologisch , also nicht durch Messungenauigkeit bedingt, innerhalb eines Eigenwertspektrums zufällig. Unterschiedliches statistisches Verhalten von Fermionen und Bosonen.
Messung	Die Messwerte sind durch Reduktion auf Eigenwerte eindeutig. bestimmt.
Komplementarität	Ortseigenschaft und Interferenzmuster sind nicht gleichzeitig beobachtbar, sondern schließen sich gegenseitig aus. Wenn es zwei Möglichkeiten in der Quantenphysik gibt, so werden beide mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit angenommen. Konjugierte physikalische Größen wie Ort und Impuls, Energie und Zeit sind nicht gleichzeitig beliebig genau messbar. (Unbestimmtheit).
Verschränkung	Eigenschaften eines Systems von Teilchen sind miteinander nichtlokal korreliert. Eine Eigenschaft eines Teilchens ist ohne Verzögerung auch bei einem anderen anzutreffen. Verschiedene Teilchen scheinen als ein Objekt zu reagieren. Zu diesem Konzept gehören auch Anwendungen und (Gedanken)-Experimente, wie das EPR-Experiment.

Spin und Symmetrien wurden jeweils nur einmal genannt, daher nicht aufgenommen

Was sollen Studenten aus ihrer Lehrveranstaltung mitnehmen?

Kategorienbildung im Split-Half-Design	Definition
Konzepte	Den Studenten sollen die wesentlichen Konzepte und begriffliche Grundlagen der Quantenphysik vermittelt werden.
Geschichte	Die Studenten sollen die geschichtliche Entwicklung des Theoriegebäudes der Quantenphysik kennen lernen.
Formalismus	Die Studenten sollen die formalen, insbesondere mathematischen Grundlagen der Quantenphysik anwenden.
AnwendungenExperimente	Die Studenten lernen die wichtigsten Anwendungen und Beispiele des quantenphysikalischer Formalismus, z.B. in Experimenten, aber auch in technischen Anwendungen kennen.
Philosophische Aspekte	Studenten kennen philosophische Aspekte, z.B. unterschiedliche Interpretationsmöglichkeiten, der Quantenphysik und lernen einen über das Teilgebiet hinausgehenden, höheren Standpunkt einzunehmen.
Unterrichtsmethode	Studenten lernen Unterrichtsmethoden und didaktische Fragen theoretisch oder praktisch kennen.

Welche für Lehramtsstudenten wesentliche Themen der Quantenphysik werden behandelt?

Kategorienbildung im Split-Half-Design	Definition
Konzepte	Hierunter fallen wesentlichen Konzepte der Quantenphysik wie statistisches Verhalten , Interferenz , indeterministische Messung , Komplementarität /Unbestimmtheit und Verschränkung . Hinzu kommt das Thema Spin , der hier häufiger als in der Frage zu den Konzepten auftritt.
Formalismus	Beschreibung des grundlegenden mathematischen Kalküls: Zustand eines Systems über die Wellenfunktion , ev. in bra-ket -Schreibweise, deren deterministische Entwicklung über Schrödingergleichung und der Observablen über hermitesche Operatoren
Geschichte	Aspekte der geschichtliche Entwicklung des Theoriegebäudes der Quantenphysik
Anwendungen	Die Studenten lernen die wichtigsten Anwendungen und Beispiele des quantenphysikalischer Formalismus, z.B. in Experimenten, aber auch in technischen Anwendungen kennen.
Philosophie	Übergreifende philosophische Aspekte, z.B. unterschiedliche Interpretationsmöglichkeiten und Modelle der Quantenphysik
VertiefungAusblick	Über das Teilgebiet hinausgehender, höherer Standpunkt Bsp.: Vergleich von Prinzipien der klassischen Physik mit der Quantenphysik

Was sind die Ziele ihrer Lehrveranstaltung?

Kategorienbildung im Split-Half-Design	Definition
Konzepte	Den Studenten sollen die wesentlichen Konzepte und begriffliche Grundlagen der Quantenphysik vermittelt werden.
Geschichte	Die Studenten sollen die geschichtliche Entwicklung des Theoriegebäudes der Quantenphysik kennen lernen.
Formalismus	Die Studenten sollen die formalen, insbesondere mathematischen Grundlagen der Quantenphysik verstehen und können diese anwenden.
AnwendungenExperimente	Die Studenten lernen die wichtigsten Anwendungen und Beispiele des quantenphysikalischer Formalismus, z.B. in Experimenten, aber auch in technischen Anwendungen kennen.
Philosophische Aspekte	Studenten kennen philosophische Aspekte der Quantenphysik, vor allem zur Interpretation, und lernen einen über das Teilgebiet hinausgehenden, höheren Standpunkt einzunehmen.
Unterrichtsmethode	Studenten lernen Unterrichtsmethoden theoretisch oder praktisch kennen.

Literaturverzeichnis

- ANDERSON, C. und K. ROTH (1989). *Teaching for meaningful and self-regulated learning of science*. Advances in Research on Teaching, 1:265–310.
- AUSUBEL, D. (1960). *The use of advance organizers in the learning and retention of meaningful verbal material*. Journal of Educational Psychology, 51(5):267–272.
- BADER, F. und F. DORN (2010). *Dorn / Bader Physik SII*. Schroedel Verlag GmbH, Braunschweig.
- BAER, M., G. DÖRR, U. FRAEFEL, M. KOCHER, O. KÜSTER, S. LARCHER, P. MÜLLER, W. SEMPET und C. WYSS (2007). *Werden angehende Lehrpersonen durch das Studium kompetenter? Kompetenzaufbau und Standarderreichung in der berufswissenschaftlichen Ausbildung an drei Pädagogischen Hochschulen in der Schweiz und in Deutschland*. Unterrichtswissenschaft, 35:15–47.
- BAILY, C. und N. FINKELSTEIN (2009). *Development of quantum perspectives in modern physics*. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 5(1):010106:1–8.
- BAILY, C. und N. FINKELSTEIN (2010a). *Refined characterization of student perspectives on quantum physics*. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 6(2):020113:1–11.
- BAILY, C. und N. FINKELSTEIN (2010b). *Teaching and understanding of quantum interpretations in modern physics courses*. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 6(1):010101:1–11.
- BAILY, C. und N. FINKELSTEIN (2012). *Interpretive themes in quantum physics: Curriculum development and outcomes*. AIP Conference Proceedings, 1413(1):107–110.
- BATTAGLIA, R., L. CAZZANIGA, F. CORNI, A. DE AMBROSIO, C. FAZIO, M. GILBERTI, O. LEVRINI, M. MICHELINI, A. MOSSSENTA, L. SANTI, R. SPERANDEO und A. STEFANEL (2010). *Master Idifo (Innovazione Didattica in Fisica E Orientamento): a Community of Italian Physics Education Researchers and Teachers As A model for a Research Based in-Service Teacher Development in modern Physics*. In: RAINE, D., Hrsg.: *Girep 2009*, S. 97–136, Leicester. Lulu / The Centre for Interdisciplinary Science.
- BAUMERT, J., W. BLUM, M. BRUNNER, T. DUBBERKE, A. JORDAN, U. KLUSMANN, S. KRAUSS, M. KUNTER, K. LÖWEN und M. NEUBRAND (2009). *Professionswissen*

- von Lehrkräften, kognitiv aktivierender Mathematikunterricht und die Entwicklung von mathematischer Kompetenz (COACTIV): Dokumentation der Erhebungsinstrumente. Max-Planck-Inst. für Bildungsforschung, Berlin.
- BAUMERT, J. und O. KÖLLER (2000). *Motivation, Fachwahlen, selbstreguliertes Lernen und Fachleistungen im Mathematik- und Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe*. In: *TIMSS-III. Dritte Internationale Mathematik- und Naturwissenschaftsstudie. Mathematische und naturwissenschaftliche Bildung am Ende der Schullaufbahn. 2. Mathematische und physikalische Kompetenzen am Ende der gymnasialen Oberstufe.*, S. 181–213. Springer, Berlin.
- BAUMERT, J., M. KUNTER, W. BLUM, M. BRUNNER, T. VOSS, A. JORDAN, U. KLUSMANN, S. KRAUSS, M. NEUBRAND und Y.-M. TSAI (2010). *Teachers' Mathematical Knowledge, Cognitive Activation in the Classroom, and Student Progress*. *American Educational Research Journal*, 47(1):133–180.
- BLÖMEKE, S. (2008). *Messung des fachbezogenen Wissens angehender Mathematiklehrkräfte*. In: *Professionelle Kompetenz angehender Lehrerinnen und Lehrer. Wissen, Überzeugungen und Lerngelegenheiten deutscher Mathematikstudierender und -referendare*, S. 49–88. Waxmann Verlag, Münster.
- BONATO, M. (1990). *Wissensstrukturierung mittels Struktur-Lege-Techniken : eine graphentheoretische Analyse von Wissensnetzen*. In: *Europäische Hochschulschriften : Reihe 6, Psychologie*, S. 211. Lang, Frankfurt am Main.
- BORN, B. (2007). *Lernen mit Alltagsphantasien: zur expliziten Reflexion impliziter Vorstellungen im Biologieunterricht*. Springer, Berlin.
- BOROWSKI, A., S. KIRSCHNER, S. LIEDTKE und H. FISCHER (2011). *Vergleich des Fachwissens von Studierenden , Referendaren und Lehrenden in der Physik*. *PhyDid*, 10(1):1–9.
- BORTZ, J. und N. DÖRING (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation*. Springer, Berlin, 4. Aufl.
- BORTZ, J. und C. SCHUSTER (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin.
- BOUJAOUDE, S. (2011). *Modern Developments in Science Education*. *Research in Science Education*, 2008:4.
- BRANSFORD, J. (1993). *Who ya gonna call? Thoughts about teaching problem solving*. *Cognitive perspectives on educational leadership*, S. 171–191.
- BROMME, R. (1997). *Kompetenzen, Funktionen und unterrichtliches Handeln des Lehrers*. *Psychologie des Unterrichts und der Schule*, 3:177–212.

- CAÑAS, A., L. BUNCH, P. REISKA und J. NOVAK (2013). *CmapAnalysis: An Extensible Concept Map Analysis Tool*. Journal for Educators, Teachers and Trainers, 4(1):36–46.
- CARR, L. und S. MCKAGAN (2009). *Graduate quantum mechanics reform*. American Journal of Physics, 77(4):308–319.
- CLEVELAND, W. (1979). *Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots*. Journal of the American Statistical Association, 74(368):829–836.
- DAMMASCHKE, T., R. MÜLLER und A. STRAHL (2010). *Das neue milq - Quantenphysik in der Schule*. PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, S. 2–5.
- DANCY, M. und C. HENDERSON (2007). *Framework for articulating instructional practices and conceptions*. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 3(1):010103:1–15.
- DARLING-HAMMOND, L. (2006). *Constructing 21st-Century Teacher Education*. Journal of Teacher Education, 57(3):300–314.
- DESLAURIERS, L. und C. WIEMAN (2011). *Learning and retention of quantum concepts with different teaching methods*. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 7(1):010101:1–6.
- DIJK, E. VAN und U. KATTMANN (2007). *A research model for the study of science teachers' PCK and improving teacher education*. Teaching and Teacher Education, 23(6):885–897.
- DUBSON, M., S. GOLDHABER, S. POLLOCK und K. PERKINS (2009). *Faculty disagreement about the teaching of quantum mechanics*. In: MEL SABELLA, C. HENDERSON und C. SINGH, Hrsg.: *AIP Conference Proceedings*, Bd. 1179, S. 137–140.
- DUIT, R. (1991). *Students' conceptual frameworks: Consequences for learning science*. In: GLYNN, S. M., B. K. BRITTON und R. H. YEANY, Hrsg.: *The psychology of learning science*, Kap. 4, S. 65–85. Routledge, New York.
- EDER, F. (2002). *Unterrichtsklima und Unterrichtsqualität*. Unterrichtswissenschaft, 30(3):213–229.
- FALK, J. (2007). *Students' depictions of quantum mechanics: a contemporary review and some implications for research and teaching*. Dissertation, Uppsala University.
- FEYNMAN, R., S. SUMMERER und G. KURZ (1993). *Vom Wesen physikalischer Gesetze*. Piper Verlag, München, Zürich.
- FISCHER, H., A. BOROWSKI und D. LEUTNER (2011). *Professionswissen in den Naturwissenschaften (ProwiN)-Videostudie: Fortsetzungsantrag*. Technischer Bericht
- FISCHLER, H. (2000). *Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der*

- Physik & Chemie*. Logos Verlag, Berlin.
- FREY, A. (2008). *Kompetenzstrukturen von Studierenden in der ersten und zweiten Phase der Lehrerbildung*, Bd. 23. Verlag Empirische Pädagogik.
- FRIECE, G. und G. LIND (2004). *Aus Bildung und Wissenschaft-Leistungsmessung im Leistungskurs*. Mathematischer und Naturwissenschaftlicher Unterricht, 57(5):259–265.
- GETZELS, J. und P. JACKSON (1970). *Merkmale der Lehrerpersönlichkeiten*. In: INGENKAMP, K, Hrsg.: *Handbuch der Unterrichtsforschung*, S. 1353–1526. Beltz, Weinheim.
- GLÄSER-ZIKUDA, M., T. SEIDEL, C. ROHLFS und A. GRÖSCHNER (2012). *Mixed Methods in der empirischen Bildungsforschung*. Waxmann Verlag, New York.
- GLASERSFELD, E. (2008). *Radikaler Konstruktivismus*. Suhrkamp, Berlin.
- GRAMZOW, Y., J. RIESE und P. REINHOLD (2011). *Wissensbasierte Kompetenzprofile angehender Physiklehrkräfte*. PhyDid A, Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, 10(1):10–21.
- GRAMZOW, Y., J. RIESE und P. REINHOLD (2013). *Modellierung fachdidaktischen Wissens angehender Physiklehrkräfte*. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 19:7–30.
- GRECA, I. und O. FREIRE (2003). *Does an Emphasis on the Concept of Quantum States Enhance Students' Understanding of Quantum Mechanics?*. Science & Education, 12:541–557.
- GREENO, J., J. MOORE und D. SMITH (1993). *Transfer of situated learning*. In: DETTERMAN, D. und R. STERNBERG, Hrsg.: *Transfer on Trial: Intelligence, Cognition, and Instruction*, S. 99–167. Ablex Publishing.
- GREHN, J. und J. KRAUSE (2007). *Metzler Physik SII: Schülerband SII*. Schroedel Verlag GmbH; Auflage: 4. Auflage.
- GROSSMANN, P. (1990). *The making of a teacher: Teacher knowledge and teacher education*. Teachers College Press, New York.
- GROSSMANN, S. und K. URBAN (2006). *Thesen für ein modernes Lehramtsstudium im Fach Physik*. Technischer Bericht, Deutsche Physikalische Gesellschaft.
- GUNSTONE, R. und J. NORTHFIELD (1986). *Learners–Teachers–Researchers: Consistency in Implementing Conceptual Change..* In: AERA. Eric.
- HAMMANN, M. und J. JÖRDENS (2014). *Offene Aufgaben codieren*. In: Krüger, D., Parchmann, I. & Schecker, H. (Hrsg.): *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*, S. 169–178. Springer, Berlin.
- HATTIE, J. (2009). *Visible learning / a synthesis of over 800 meta-analyses relating to*

- achievement*. Routledge, London [u.a.].
- HATZINGER, R., K. HORNIK und H. NAGEL (2011). *R: Einführung durch angewandte Statistik*. Pearson, Hallbergmoos.
- HENDRY, G. (1996). *Constructivism and educational practice*. Australian journal of education, 40(1):19–45.
- HERIEKS, U. und I. KUNZE (2002). *Entwicklungsaufgaben von Lehramtsstudierenden, Referendaren und Berufseinsteigern*. Zeitschrift für Erziehungswissenschaft, 5(3):401–416.
- HEUSLER, S. (2010). *Quantendimensionen: Doppelspalt - Verschränkung - Quantencomputer*.
- HILFERT-RÜPPEL, D., A. EGHTESSAD, M. LOOSS und K. HÖNER (2012). *Empirische Studien zum Professionalisierungsprozess in den naturwissenschaftlichen Fächern der Lehramtsstudiengänge*. Lehrerbildung auf dem Prüfstand, 5(2):157–179.
- HONEBEIN, P., T. DUFFY und B. FISHMAN (1993). *Constructivism and the design of learning environments: Context and authentic activities for learning*. T.M. Duffy, J.Lowyck, & D.H. Jonas (Eds.), Designing environments for constructive learning, S. 87–108.
- IRESON, G. (1999). *A multivariate analysis of undergraduate physics students' conceptions of quantum phenomena*. European Journal of Physics, 20(3):193.
- JENKINS, E. (2000). *Constructivism in school science education: powerful model or the most dangerous intellectual tendency?*. Science & Education, 9:599–610.
- JOHNSTON, I., K. CRAWFORD und P. FLETCHER (1998). *Student difficulties in learning quantum mechanics*. International Journal of Science Education, 20(4):427–446.
- KALKANIS, G., P. HADZIDAKI und D. STAVROU (2003). *An Instructional Model for a Radical Conceptual Change Towards Quantum Mechanics Concepts*. Science Education, 87(2):257–280.
- KARAKOSTAS, V. und P. HADZIDAKI (2005). *Realism vs. constructivism in contemporary physics: The impact of the debate on the understanding of quantum theory and its instructional process*. Science and Education, 14(7-8):607–629.
- KATTMANN, U., R. DUIT, H. GROPENGIESSER und M. KOMOREK (1997). *Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung*. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 3(3):3–18.
- KENNEDY, M. (1990). *Policy issues in teacher education*. Phi Delta Kappan, 72(9):658–665.
- KIRCHER, E., R. GIRWIDZ und P. HÄUSSLER (2009). *Physikdidaktik: Theorie und Praxis*.

- Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin.
- KIRSCHNER, S. (2013). *Modellierung und Analyse des Professionswissens von Physiklehrkräften*. Dissertation, Duisburg-Essen.
- KIRSCHNER, S., A. BOROWSKI und H. FISCHER (2011). *Physics Teachers' Content Knowledge and Pedagogical Content Knowledge: Developing Test Scales and Measuring the Relation*. In: NARST, S. 1–17.
- KMK (2004). *Einheitliche Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Physik*.
- KOC, M. (2012). *Pedagogical knowledge representation through concept mapping as a study and collaboration tool in teacher education*. Australasian Journal of Educational Technology, 28(4):656–670.
- KOHLEN, M. (2012). *Design-Based Research: eine grundlegende Forschungsperspektive für die fachdidaktische Unterrichtsforschung in den Naturwissenschaften*. In: GLÄSER-ZIKUDA, MICHAELA, T. SEIDEL und C. ROHLFS, Hrsg.: *Mixed Methods in der empirischen Bildungsforschung*, S. 151–164. Waxmann Verlag, Münster.
- KOHNLE, A., C. BAILY, A. CAMPBELL, N. KOROLKOVA und M. PAETKAU (2015). *Enhancing student learning of two-level quantum systems with interactive simulations*. American Journal of Physics, 83(6):560–566.
- KOOPMAN, L., W. KAPER und T. ELLERMEIJER (2005). *Understanding Student Difficulties in First Year Quantum Mechanics Courses*. EPEC Proceedings EPS 2005, S. 4–8.
- KRAUSS, S. und M. KUNTER (2004). *COACTIV: Professionswissen von Lehrkräften, kognitiv aktivierender Mathematikunterricht und die Entwicklung von mathematischer Kompetenz*.
- KRAYNOVA, A. (2012). *Didaktische Rekonstruktion der Nanophysik. Analytische und empirische Untersuchungen in einem interdisziplinären Forschungsfeld*. 1. Aufl.. Didaktisches Zentrum, Carl von Ossietzky Univ., Oldenburg.
- KREUTZMANN, H. (2003). *Theorie und Praxis in der Lehrerbildung*, Bd. 58 d. Reihe *Beiträge zur Professionalisierung der Lehrerbildung* ; 3. Leipziger Universitätsverlag, Leipzig.
- KRÜGER, D., I. PARCHMANN und H. SCHECKER (2014). *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Springer, Berlin.
- KÜBLBECK, J. und R. MÜLLER (2002). *Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder, Experimente*. Aulis-Verlag, Hallbergmoos.
- KUCKARTZ, U. (2007). *Einführung in die computergestützte Analyse qualitativer Daten*, Bd. 3. Auflage. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.

- KUCKARTZ, U. (2014). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Nr. 2. Beltz Juventa, Weinheim.
- LEE, E. und J. LUFT (2008). *Experienced secondary science teachers' representation of pedagogical content knowledge*. International Journal of Science Education, 30(10):1343–1363.
- LEINHARDT, G. und J. GREENO (1986). *The cognitive skill of teaching..* Journal of Educational Psychology, 78(2):75–95.
- LERSCH, R. (2006). *Am Anfang steht die Wissenschaft ... Grenzen und Möglichkeiten der Universität bei der Entwicklung professioneller Kompetenz*. In: *Standards und Kompetenzen - neue Qualität in der Lehrerbildung*, S. 43–49. Paderborn.
- LEVRINI, O., P. FANTINI und B. PECORI (2008). *Quantum physics*. In: *GIREP-EPEC conference. Frontiers of Physics Education Selected contributions, RIJEKA Zlatni rez*, S. 319–324, Bologna. Department of Physics.
- LICHTFELDT, M. (1992). *Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch Unterricht*. Westarp Wissenschaften.
- LIN, S. und C. SINGH (2016). *Categorization of Quantum Mechanics Problems by Professors and Students*. European Journal of Physics, 31(1):57–68.
- LIU, X. und M. HINCHEY (1996). *The internal consistency of a concept mapping scoring scheme and its effect on prediction validity*. International Journal of Science Education, 18(December 2014):921–937.
- LOHMANN, G. (2006). *Didaktische Rekonstruktion in der Hochschuldidaktik*. Journal für Lehrerinnen- und Lehrerbildung, (2):65–73.
- LUHMANN, M. (2013). *R für Einsteiger: Einführung in die Statistiksoftware für die Sozialwissenschaften. Mit Online-Materialien*. Beltz, Weinheim ; Basel.
- MAYRING, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse Grundlagen und Techniken*. Beltz, Weinheim.
- MAYRING, P. (2012). *Qualitative Inhaltsanalyse–ein Beispiel für Mixed Methods*. In: *Mixed Methods in der empirischen Bildungsforschung*, S. 27–36. Waxmann Verlag, Münster.
- MCKAGAN, S., K. PERKINS und C. WIEMAN (2010). *Design and validation of the quantum mechanics conceptual survey*. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 6(2):020121.
- MICHELINI, M., R. RAGAZZON und L. SANTI (2000). *Proposal for quantum school*. Physics Education, 35.
- MICHELINI, M., L. SANTI und A. STEFANEL (2007). *Worksheets for pupils involvement in learning quantum mechanics*. In: *GIREP EPEC Conference Frontiers of Physics*

- Education*, S. 102–111.
- MICHELINI, M., L. SANTI und A. STEFANEL (2014). *Teaching modern physics in secondary school*. In: *Proceedings of Science*, Bd. 15-18-July, S. 1–10.
- MICHELINI, M. und A. STEFANEL (2009). *Secondary school teachers discussing the pedagogical and cultural aspects in teaching- learning quantum physics*.
- MIETZEL, G. (2007). *Pädagogische Psychologie des Lernens und Lehrens*. Hogrefe, Göttingen.
- MIKELSKIS-SEIFERT, S. und H. FISCHLER (2003). *Die Bedeutung des Denkens in Modellen bei der Entwicklung von Teilchenvorstellungen - Empirische Untersuchung zur Wirksamkeit der Unterrichtskonzeption*. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 9:89–104.
- MOOSBRUGGER, H. und A. KELAVA (2012). *Testtheorie und Fragebogen- konstruktion*. Springer, Berlin.
- MÜLLER, R. (2003a). *Fragebogen zur Atom- und Quantenphysik*.
- MÜLLER, R. (2003b). *Quantenphysik in der Schule*. Nr. 26.
- MÜLLER, R. und H. WIESNER (1997). *Vorstellungen von Lehramtsstudenten zur Interpretation der Quantenmechanik - Ergebnisse von Befragungen*. Zur Didaktik der Physik und Chemie. Probleme und Perspektiven, Tagung 199:382–384.
- MÜLLER, R. und H. WIESNER (2000). *Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik : erste empirische Ergebnisse*.
- MÜLLER, R., H. WIESNER und H. HOFF (2000). *Nutzung des Internets zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik*. Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht (MNU), 54:23.
- MÜLLER, R., H. WIESNER und H. HOFF (2001). *Nutzung des Internet zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik*. MNU (Der Math. und Naturw. Unterricht), 54(1):23–27.
- NAWRATH, D. (2010). *Kontextorientierung - Rekonstruktion einer fachdidaktischen Konzeption für den Physikunterricht*. Dissertation, Oldenburg.
- NEUWEG, G. (2011). *Das Wissen der Wissensvermittler. Problemstellungen, Befunde und Perspektiven der Forschung zum Lehrerwissen*. In: *Handbuch der Forschung zum Lehrerberuf*, S. 451–477.
- NOVAK, J. (1984). *Learning How to Learn*. Cambridge University Press.
- NOVAK, J. (1998). *Learning, Creating and Using knowledge*. Routledge, New York, London.
- OSER, F., S. HEINZER und P. SALZMANN (2010). *Die Messung der Qualität von*

- professionellen Kompetenzprofilen von Lehrpersonen mit Hilfe der Einschätzung von Filmvignetten*. Unterrichtswissenschaft, 38(1):5–28.
- PAJARES, M. (1992). *Teachers' beliefs and educational research: Cleaning up a messy construct*. Review of educational research.
- PEREIRA, A., F. OSTERMANN und C. CAVALCANTI (2009). *On the use of a virtual Mach-Zehnder interferometer in the teaching of quantum mechanics*. Physics Education, 44(3):281–291.
- PEUCKERT, J. (1999). *Concept Mapping - Lernen wir unsere Schüler kennen*. Physik in der Schule, 37(1):47–55.
- POSNER, G., K. STRIKE, P. HEWSON und W. GERTZOG (1982). *Accommodation of a science concept: Toward a theory of conceptual change*. Science Education, 66(2):211–227.
- POSPIECH, G. (2000). *Uncertainty and complementarity: the heart of quantum physics*. Physics Education, 35(6):393–399.
- POSPIECH, G. (2004). *Moderne Quantenphysik im Unterricht: ein Lehrgang*. Logos-Verl., Berlin.
- POSPIECH, G. (2016). *Quantenphysik intuitiv erfahren - das GHZ-Spiel*. Praxis der Naturwissenschaften in der Schule, 65(1):33–35.
- POSPIECH, G. und M. SCHÖNE (2014). *Quantum Physics in Teacher Education*. In: SIDHARTH, B., M. MICHELINI und L. SANTI, Hrsg.: *Frontiers of Fundamental Physics and Physics Education Research*, Bd. 145, S. 407–416.
- RASCH, B., M. FRIESE, W. HOFMANN und E. NAUMANN (2010). *Quantitative Methoden Band 1*. Springer, Berlin ; Heidelberg.
- REHM, M. und K. BÖLSTERLI (2014). *Entwicklung von Unterrichtsvignetten*. In: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*, S. 213–225.
- REICH, K. (2005). *Systemisch-konstruktivistische Pädagogik: Einführung in Grundlagen einer interaktionistisch-konstruktivistischen Pädagogik*. Beltz, Landsberg.
- REINHOLD, P. (2004). *Naturwissenschaftsdidaktische Forschung in der Lehrerbildung*. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 10:117–146.
- RENKL, A. (2008). *Lehrbuch Pädagogische Psychologie*. Verlag Hans Huber, Göttingen.
- REUSSER, K. und H. MESSNER (2002). *Das Curriculum der Lehrerinnen- und Lehrerbildung - ein vernachlässigtes Thema*. Beiträge zur Lehrerbildung, 20(3):282–298.
- RIESE, J. (2008). *Aufgaben zum fachdidaktischen Studium Physik*.
- RIESE, J. (2009). *Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften*, Bd. 97 d. Reihe Studien zum Physik- und Chemielernen.

Logos, Berlin.

- RIESE, J. (2010). *Empirische Erkenntnisse zur Wirksamkeit der universitären Lehrerbildung Indizien für notwendige Veränderungen der fachlichen Ausbildung von Physiklehrkräften*. Didaktik der Physik, 9:25–33.
- RIESE, J. und P. REINHOLD (2010). *Empirische Erkenntnisse zur Struktur professioneller Handlungskompetenz von angehenden Physiklehrkräften*. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 16:167–188.
- RIESE, J. und P. REINHOLD (2012). *Die professionelle Kompetenz angehender Physiklehrkräfte in verschiedenen Ausbildungsformen : Empirische Hinweise für eine Verbesserung des Lehramtsstudiums*. Zeitschrift für Erziehungswissenschaft, 15(1):111–143.
- RIESE, J. und P. REINHOLD (2014). *Entwicklung eines Leistungstests für fachdidaktisches Wissen*. In: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*, S. 257–267.
- ROBERTSON, E. und A. KOHNLE (2010). *Testing The Development Of Student Conceptual Understanding Of Quantum Mechanics*. In: *GIREP-EPEC & PHEC 2009 Conference*, S. 261–273.
- ROSENSHINE, B. (1979). *Content, time and direct instruction*. Research on teaching: Concepts, findings and implications, S. 28–56.
- ROSENSHINE, B. (1986). *Teaching functions*. In: *Handbook of research on teaching*, S. 376–391. Formapex.
- RUIZ-PRIMO, M. und R. SHAVELSON (1996). *Problems and issues in the use of concept maps in science assessment*. Journal of Research in Science Teaching, 33(6):569–600.
- RUIZ-PRIMO, M. und R. SHAVELSON (1997). *Concept-Map Based Assessment: On Possible Sources of Sampling Variability*. S. 85.
- RUMELHART, D. und D. NORMAN (1978). *Das aktive strukturelle Netz*. In: *Strukturen des Wissens*. Klett-Cotta, Stuttgart.
- SAUL, J. und E. REDISH (1997). *Final Evaluation Report for FIPSE Grant # P116P50026 : Evaluation of the Workshop Physics Dissemination Project*.
- SAUTER, A., W. SAUTER und H. BENDER (2004). *Blended Learning: Effiziente integration von e-learning und präsentstraining*. Luchterhand, München.
- SCHILCHER, K. (2010). *Theoretische Physik kompakt für das Lehramt*. Oldenbourg Verlag.
- SCHMÜSER, P. (2012). *Theoretische Physik Für Studierende Des Lehramts 1: Quantenmechanik*. Springer-Verlag.
- SCHORN, B. (2014). *Quantenphysik in der Schule Eine Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik*. Dissertation, TU Dresden.

- SCHUMACHER, K. und G. LIND (2000). *Praxisbezug im Lehramtsstudium – Bericht einer Befragung von Konstanzer LehrerInnen und Lehramtsstudierenden*. Technischer Bericht, Universität Konstanz, Konstanz.
- SEIDEL, T. und R. SHAVELSON (2007). *Teaching effectiveness research in the past decade: The role of theory and research design in disentangling meta-analysis results*. Review of Educational Research, 77(4):454–499.
- SHULMAN, L. (1986). *Those Who Understand : Knowledge Growth in Teaching*. Educational Researcher, 15(2):4–14.
- SHULMAN, L. (1987). *Knowledge and teaching: Foundations of the new reform*. Harvard educational review, 57(1):1–21.
- SIEBERT, H. (1999). *Pädagogischer Konstruktivismus*. Luchterhand, Neuwied.
- SINGH, C. (2001). *Student understanding of quantum mechanics*. American Journal of Physics, 69(8):885.
- SINGH, C. (2008). *Student understanding of quantum mechanics at the beginning of graduate instruction*. American Journal of Physics, 76(3):277.
- STRACKE, I. (2004a). *Concept Maps zur Wissensdiagnose in Chemie [Concept maps for diagnosis of knowledge in chemistry]*. Münster: Waxmann Verlag GmbH.
- STRACKE, I. (2004b). *Einsatz computerbasierter concept maps zur Wissensdiagnose in der Chemie: empirische Untersuchungen am Beispiel des chemischen Gleichgewichts*. Waxmann Verlag, Münster.
- TASHAKKORI, A. und C. TEDDLIE (2010). *Sage Handbook of Mixed Methods in Social & Behavioral Research*, Bd. 2nd.
- TEPNER, O., A. BOROWSKI, S. DOLLNY, H. FISCHER, M. JÜTTNER, S. KIRSCHNER, D. LEUTNER, B. NEUHAUS, A. SANDMANN, E. SUMFLETH, H. THILLMANN und J. WIRTH (2012). *Modell zur Entwicklung von Testitems zur Erfassung des Professionswissen von Lehrkräften der Naturwissenschaften*. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 18:7–28.
- TOUTENBURG, H. (2000). *Induktive Statistik*. Springer-Lehrbuch. Berlin.
- UHDEN, O. (2012). *Mathematisches Denken im Physikunterricht: Theorieentwicklung und Problemanalyse*. Doktorarbeit
- VOSNIADOU, S. (1994). *Capturing and modeling the process of conceptual change*. Learning and Instruction, 4(1):45–69.
- VYGOTSKY, L. (1986). *Thought and language*. MIT Press.
- WALLACE, J. und J. MINTZES (1990). *The concept map as a research tool: Exploring*

- conceptual change in biology*. Journal of Research in Science Teaching, 27(10):1033–1052.
- WANG, M., G. HAERTEL und H. WALBERG (1990). *What influences learning? A content analysis of review literature*. The Journal of Educational Research, S. 30–43.
- WARD, J. (1963). *Hierarchical grouping to optimize an objective function*. Journal of the American Statistical Association, 58(301):236–244.
- WIESNER, H. (2008). *Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik Rainer Müller und Hartmut Wiesner*. Technischer Bericht, Technische Universität München, München.
- WILHELM, T. und M. HOPF (2014). *Design-Forschung*. In: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*, S. 31–41. Springer, Berlin.
- WILMS, M. (2011). *Schüler auf dem Weg ins Diskontinuum. Empirische Studien über die Entwicklung und Nachhaltigkeit eines ersten Teilchenkonzepts mithilfe von Schülerexperimenten*. 1. Aufl.. Didaktisches Zentrum, Oldenburg.
- WITTMANN, M., J. MORGAN und L. BAO (2005). *Addressing student models of energy loss*. Technischer Bericht
- WOITKOWSKI, D., J. RIESE und P. REINHOLD (2011). *Modellierung fachwissenschaftlicher Kompetenz angehender Physiklehrkräfte Modelling Content Knowledge of Prospective Physics Teachers*. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 17:289–314.
- WOITKOWSKI, D., J. RIESE und P. REINHOLD (2012). *Messung des Fachwissens von Physikstudenten - Erste Ergebnisse einer Pilotstudie -*. In: *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, S. 1–8.
- WOLF, C. und H. BEST (2010). *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
- YAGER, R. (1995). *Constructivism and the learning of science*. In: *Learning science in the schools: Research reforming practice*, S. 35–58. Routledge, New York, London.
- ZOLLMAN, D. (1999). *Research on teaching and learning quantum mechanics*. In: ZOLLMAN, DEAN A, Hrsg.: *Annual meeting of National Association for Research in Science Teaching*, S. 46.
- ZOLLMAN, D., N. REBELLO und K. HOGG (2002). *Quantum mechanics for everyone: Hands-on activities integrated with technology*. American Journal of Physics, 70(3):252.
- ZUCCARINI, G., M. MICHELINI und A. STEFANEL (2013). *Questioning with university students on stationarity, time evolution and connection between sets of eigenstates in quantum mechanics*. In: *ESERA 2013 Conference*.

Abbildungsverzeichnis

1.1. Aufbau der Arbeit	6
1.2. Theoretisches Modell	
grün: Hochschuldidaktische Rekonstruktion	
rot: Didaktische Rekonstruktion auf Schulniveau	10
2.1. Ein Beispiel für das Verhältnis problematischer quantenphysikalischer Konzepte nach ZUCCARINI et al. (2013, S.6)	22
2.2. Unterschiede zwischen PCK und PCK-S-Studies nach VAN DIJK und KATTMANN (2007)	26
2.3. Das Modell der didaktischen Rekonstruktion nach KATTMANN et al. (1997)	27
2.4. ERTE-Modell nach VAN DIJK und KATTMANN (2007)	29
3.1. Arbeiten zur hochschuldidaktischen Rekonstruktion des Themas Quantenphysik, eigene Erhebungen/Konzeptionen sind fett dargestellt	31
3.2. Lehrgang des Frankfurter Modells POSPIECH (2004), die Pflichtmodule sind grau unterlegt.	39
3.3. Module des Dirackonzeptes nach MICHELINI et al. (2007)	41
3.4. Beispiel für ikonische Repräsentation nach MICHELINI et al. (2000, S.409) .	43
3.5. Struktur der Lektionen im Lehrer-Online-Kurs zur Quantenphysik milq . .	46
4.1. Abgrenzung des fachdidaktischen Wissens PCK von anderen Formen des Lehrerwissens, zit. nach VAN DIJK und KATTMANN (2007)	57
4.2. Aspekte fachdidaktischen Wissens bei verschiedenen Autoren, zit. nach GRAMZOW et al. (2013)	58
4.3. Eindimensionales Facettenmodell fachdidaktischen Wissens nach RIESE (2009), zit. nach GRAMZOW et al. (2013)	59
6.1. Der Aufbau der Anforderungsanalyse	71
7.1. Prozentanteile der von Studenten wahrgenommenen Vorlesungsinhalte . . .	82
7.2. Vorlesungsinhalte - Dendrogramm der Clusteranalyse im Single-Linkage-Verfahren	85

7.3. Vorlesungsinhalte - Dendrogramm der Haupt-Clusteranalyse im Complete-Linkage-Verfahren mit drei identifizierten Gruppen (graue Rechtecke, Labels wurde für die Übersichtlichkeit entfernt)	86
7.4. Studentische Einschätzung der vermittelten Kompetenz 1	88
7.5. Studentische Einschätzung der vermittelten Kompetenz 2	89
7.6. Gewünschte Inhalte des Zusatzseminars, SV Schülervorverständnis, PM physikalische Modellbildung	90
7.7. Zusatzinhalte - Dendrogramm der Clusteranalyse im Single-Linkage-Verfahren	94
7.8. Zusatzinhalte - Dendrogramm der Clusteranalyse im Complete-Linkage-Verfahren mit Gruppenzuordnung	95
7.9. Geeignete Schulinhalte	96
7.10. Geeignete Schulinhalte 2	97
7.11. Geeignete Schulinhalte - Dendrogramm der Clusteranalyse im Single-Linkage-Verfahren	101
7.12. Geeignete Schulinhalte - Dendrogramm der Clusteranalyse im Complete-Linkage-Verfahren mit Gruppenzuordnung	102
7.13. Erwünschte Ziele und tatsächlich behandelte Themen der Dozenten	103
7.14. Hindernisse aus Dozentensicht	105
7.15. Vermittelte Kompetenzen aus Dozentensicht	107
7.16. Kompetenzen - Dendrogramm der Clusteranalyse im Single-Linkage-Verfahren zur Identifizierung von Ausreißern	108
7.17. Kompetenzen - Dendrogramm der Haupt-Clusteranalyse im Complete-Linkage-Verfahren mit Gruppenzuordnung in den drei Kästen	109
7.18. Die wichtigsten quantenphysikalischen Konzepte aus Dozentensicht	111
7.19. Deutlichkeit der Grundkonzepte aus Studentensicht	113
10.1. Beispiel für die Simulation eines Quantenradierers mit Nutzung von drei Polarisationsfiltern (PEREIRA et al., 2009)	135
10.2. Die Entwicklung des Professionswissens	140
11.2. Kerndichtediagramm Fachwissen, Normalverteilung gestrichelte, Realwerte durchgezogene Linie	149
11.1. Antwortverteilung der Testitems Fachwissen	150
11.4. Kerndichtediagramm Fachdidaktikwissen, Normalverteilung gestrichelte, Realwerte durchgezogene Linie	153
11.3. Antwortverteilung der Testitems Fachdidaktikwissen	154
12.1. Kompetenztypen - Dendrogramm der Clusteranalyse im Single-Linkage-Verfahren	168
12.2. Kompetenztypen - Dendrogramm der Clusteranalyse im Ward-Verfahren (Berücksichtigung des Ward-Kriteriums) mit Gruppenzuordnung	170

12.3. Kompetenzprofile nach GRAMZOW et al. (2011, S.18)	172
12.4. Entwicklung des durchschnittlichen Fachwissens (links) und Fachdidaktik- wissens (rechts) in Versuchs- und Vergleichsgruppe (gestrichelt)	173
12.5. Definitionswissen der Studenten nach der Theorieausbildung	174
12.6. Zusammenhang zwischen der Änderung des fachlichen Wissens und des fachdidaktischen Wissens in Versuchsgruppe und der Vergleichsgruppe . . .	176
12.7. Einschätzung der Relevanz	178
12.8. Einschätzung der Lehrbarkeit	179
12.9. Auswahl eines geeigneten linearen Modells für die Entwicklung des Fach- wissens im Seminar	182
12.10. Residuenplots des moderierten Regressionsmodells Fachwissen von links oben nach rechts unten	184
12.11. Änderung des fachlichen Wissens in Abhängigkeit des Ausgangsniveaus und der Gruppenzugehörigkeit zur Versuchsgruppe oder Vergleichsgruppe . . .	185
12.12. Auswahl eines geeigneten linearen Modells für die Entwicklung des fachdi- daktischen Wissens im Seminar	188
12.13. Residuenplots des moderierten Regressionsmodells Fachdidaktikwissen von links oben nach rechts unten	190
12.14. Änderung des fachdidaktischen Wissens in Abhängigkeit des Ausgangsnive- aus und der Gruppenzugehörigkeit	191
23.1. Residuenplots des moderierten Regressionsmodells von l	243
26.1. Residuenplots des moderierten Regressionsmodells Fachwissen von links oben nach rechts unten	251

Tabellenverzeichnis

3.1. Vier häufige Interpretationen der Quantenphysik geordnet nach drei Schlüsselthemen, zusammengefasst und übersetzt nach (BAILY und FINKELSTEIN, 2010a, S.3 und 5)	45
7.1. Korrelation der Vorlesungsinhalte, signifikante große Korrelationen sind fett gedruckt (siehe RASCH et al., 2010, S.133)	84
7.2. Die drei Gruppen der Clusteranalyse zu wahrgenommenen Vorlesungsinhalten	85
7.3. Vergleich der in der Clusteranalyse ermittelten Gruppen mit Gruppengröße hinsichtlich der wahrgenommenen Vorlesungsinhalte	87
7.4. Unterschiede in den drei Cluster-Gruppen hinsichtlich wahrgenommener Vorlesungsinhalte	87
7.5. Korrelation der gewünschten Zusatzinhalte untereinander, signifikante mittlere und starke Korrelationen sind fett gedruckt (siehe RASCH et al., 2010, S.133)	92
7.6. Die vier Gruppen der Clusteranalyse zu gewünschten Zusatzinhalten	92
7.7. Vergleich der Gruppen mit Gruppengröße hinsichtlich der gewünschten Zusatzinhalte	93
7.8. Unterschiede in den Gruppen hinsichtlich gewünschter Zusatzinhalte	93
7.9. Korrelation der geeigneten Schulinhalte untereinander, signifikante mittlere und starke Korrelationen sind fett gedruckt (siehe RASCH et al., 2010, S.133)	99
7.10. Die zwei Gruppen der Clusteranalyse zu geeigneten Schulinhalten	100
7.11. Vergleich der Gruppen mit Gruppengröße hinsichtlich geeigneter Schulinhalt	100
7.12. Kontingenz von Zielen bei der qualitativen Analyse der Dozentenantworten, x kennzeichnet das mindestens einmalige Vorkommen dieser Kategorie . . .	104
7.13. Kontingenz von Themen bei der qualitativen Analyse der Dozentenantworten	104
7.14. Korrelation der angestrebten Kompetenzen untereinander	106
7.15. Die drei Gruppen der Clusteranalyse zu angestrebten Kompetenzen	107
7.16. Vergleich der Gruppen hinsichtlich der Kompetenzen	108
7.17. Unterschiede in den Gruppen hinsichtlich der Kompetenzen	109
11.1. Interne Konsistenz der Rohdaten	147
11.2. Trennschärfe und Verteilung der Testitems	147
11.3. Änderung der Reliabilität bei Ausschluss des Items	148

11.4. Änderung der Reliabilität bei Ausschluss des Items, nach Ausschluss der Items Fachwissen 1 & 4	148
11.5. Interne Konsistenz der Rohdaten	151
11.6. Trennschärfe und Verteilung der Testitems	151
11.7. Änderung der Reliabilität bei Ausschluss des Items, nach Ausschluss von <i>Experiment</i> und <i>Rekonstruktion</i>	152
11.8. Änderung der Reliabilität bei Ausschluss des Items	152
12.1. Die vier Gruppen der Clusteranalyse der Kompetenzen	168
12.2. Vergleich der Gruppen mit Gruppengröße hinsichtlich der Kompetenzen . .	169
12.3. Unterschiede in den Gruppen hinsichtlich der Kompetenzen	171
12.4. Ergebnisse der Professionswissenstest in Versuchs- & Vergleichsgruppe (Standardabweichung in Klammern)	174
12.5. Vergleich der Versuchs- und Experimental-Gruppen im Prä- und im Post- Test des Professionswissens	175
12.6. Vergleich der Ergebnisse des Prä- und Posttests Professionswissen	175
12.7. Zusammenhang zwischen der Veränderung des fachlichen und fachdidakti- schen Wissens in der Versuchsgruppe	176
12.8. Lineare Modelle für die Änderung des Fachwissens im Seminar	181
12.9. Vergleich der linearen Modelle für die Änderung des Fachwissens im Zu- satzseminar	183
12.10 Lineare Modelle für die Änderung des fachdidaktischen Wissens im fachdi- daktischen Seminar	187
12.11 Vergleich der linearen Modelle für die Änderung des fachdidaktischen Wissens	189
16.1. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Kruskal-Wallis-Test (Mitte) und zugehörige robuste Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für Diracformalismus/Zeitentwicklung	215
16.2. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für Math. Formalismus/Schrödingergleichung	216
16.3. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für Geschichte	216
16.4. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Kruskal-Wallis-Test (Mitte) und zugehörige robuste Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich für Compton- & Photoeffekt	216
16.5. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für Bilder . .	217
16.6. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für Quanten- zahlen	217

16.7. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für Potenziale	217
16.8. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für Drehimpuls/Spin/Wasserstoff	218
17.1. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Kruksal-Wallis-Test (Mitte) und zugehörige robuste Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für Anwendungen/Beispiele	219
17.2. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Kruskal-Wallis-Test (Mitte) und zugehörige robuste Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für Methoden/Fachdid.Fragen	220
17.3. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für Grundideen/Konzepte	220
17.4. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für Interpretationen	220
17.5. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für Mathematischer Formalismus	221
18.1. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Unbestimmtheit/Verschränkung/Messung	223
18.2. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Spin/Drehimpuls	223
18.3. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und robuster t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Laser	224
18.4. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Quantencomputer-/kryptographie	224
18.5. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und robuster t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Photo-/Comptoneffekt	224
18.6. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Schrödingergleichung	224
18.7. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Welle-Teilchen-Dualismus	225
18.8. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und robuster t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Interferenz	225
18.9. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Potentiale	225

18.10	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Wellenfunktion	225
18.11	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Strahlung	226
18.12	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Quantenzahlen	226
18.13	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Messung	227
18.14	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Potentiale	227
18.15	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Wellenfunktion	228
18.16	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Strahlungsformeln	228
18.17	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Quantenzahlen	228
19.1.	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und zugehörige Post-Hoc-Tests für den Gruppenvergleich (unten) für formal- analytische Kompetenzen	229
19.2.	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Kruskal-Wallis-Test (Mitte) und zugehörige robuste Post-Hoc-Tests für Gruppenvergleich (unten) für didaktische Methoden	230
19.3.	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (unten) für Erklärung von Konzepten	230
19.4.	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (unten) für Nennung von Beispielen/Anwendungen	230
19.5.	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und Varianzanalyse (Mitte) und robuste Post-Hoc-Tests für Gruppenvergleich (unten) für Erläuterung von neuen Beispielen anhand quantenphysikalischer Prinzipien	231
20.1.	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Frage zu Erkenntnissen aus dem Interferenzexperiment	233
20.2.	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Frage zu möglichen didaktischen Funktionen aus dem Interferenzexperiment	234
20.3.	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Frage zum Fachwissen 2	234
20.4.	Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Frage zu Schülervorstellungen	234

20.5. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Frage zum Fachwissen 3	235
20.6. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Frage Wechsel vom Bohrschen zu einem differenzierten quantenmechanischen Atommodell	235
21.1. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben) und t-Test für den Gruppenvergleich (unten) für Frage zum Wissen über quantenmechanischen Definitionen	237
22.1. Zusammenhang zwischen der Veränderung der Fachwissens und Beurteilung der Lehrbarkeit quantenphysikalischer Konzepte	239
22.2. Zusammenhang zwischen der Veränderung der Fachwissens und Beurteilung der Lehrbarkeit quantenphysikalischer Konzepte	239
22.3. Zusammenhang zwischen der Veränderung der fachdidaktischen Wissens und Beurteilung der Lehrbarkeit quantenphysikalischer Konzepte	240
22.4. Zusammenhang zwischen der Veränderung der fachdidaktischen Wissens und Beurteilung der Lehrbarkeit quantenphysikalischer Konzepte	240
23.1. Lineares Modell für die Änderung von fachlichen und fachdidaktischem Wissen in der Versuchsgruppe	242
23.2. Toleranz der Prädiktoren des Modells zur Prüfung der Multikollinearität	242
24.1. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben), Lilliefors-Test auf Normalverteilung (mitte) und exakter Wilcoxon-Rangsummentest für den Gruppenvergleich (unten) Fachwissen Prä	245
24.2. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben), Lilliefors-Test auf Normalverteilung (mitte) und exakter Wilcoxon-Rangsummentest für den Gruppenvergleich (unten) Fachdidaktikwissen Prä	246
24.3. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben), Lilliefors-Test auf Normalverteilung (mitte) und exakter Wilcoxon-Rangsummentest für den Gruppenvergleich (unten) Fachwissen Post	246
24.4. Levene-Varianzhomogenitätstest (oben), Lilliefors-Test auf Normalverteilung (mitte) und exakter Wilcoxon-Rangsummentest für den Gruppenvergleich (unten) Fachdidaktikwissen Post	247
25.1. t-Test für das Fachwissen Prä/Post in der Versuchsgruppe	249
25.2. Exakter Wilcoxon-Rangsummen-Test für das fachdidaktische Wissen Prä/Post in der Versuchsgruppe	249
25.3. t-Test für das Fachwissen Prä/Post in der Vergleichssgruppe	250
25.4. t-Test für das Fachdidaktikwissen Prä/Post in der Vergleichssgruppe	250

27.1. F-Test für die Vereinfachung Fachwissen: Ausgangsmodell → Reduziertes Modell 1a	253
27.2. F-Test für die Vereinfachung Fachwissen: Ausgangsmodell → Reduziertes Modell 1b	253
27.3. F-Test für die Vereinfachung Fachwissen: Reduziertes Modell 1b → Reduziertes Modell 2	253
27.4. F-Test für die Vereinfachung Fachwissen: Reduziertes Modell 2 → Reduziertes Modell 3	254
27.5. F-Test für die Vereinfachung Fachwissen: Reduziertes Modell 3 → Reduziertes Modell 4a	254
27.6. F-Test für die Vereinfachung Fachwissen: Reduziertes Modell 3 → Reduziertes Modell 4b	254
27.7. F-Test für die Vereinfachung Fachdidaktikwissen: Ausgangsmodell → Reduziertes Modell 1a	254
27.8. F-Test für die Vereinfachung Fachdidaktikwissen: Ausgangsmodell → Reduziertes Modell 1b	254
27.9. F-Test für die Vereinfachung Fachdidaktikwissen: Reduziertes Modell 1b → Reduziertes Modell 2	254
27.10 F-Test für die Vereinfachung Fachdidaktikwissen: Reduziertes Modell 2 → Reduziertes Modell 3	255
27.11 F-Test für die Vereinfachung Fachdidaktikwissen: Reduziertes Modell 3 → Reduziertes Modell 4a	255
27.12 F-Test für die Vereinfachung Fachdidaktikwissen: Reduziertes Modell 3 → Reduziertes Modell 4b	255

35. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all denen Dank aussprechen, die zum Zustandekommen dieser Arbeit beigetragen haben. Als Erstes möchte ich mich bei Frau Prof.Dr. Gesche Pospiech für die Vergabe des Themas, die umfassende Betreuung und Begleitung und die konstruktiven Anregungen herzlich bedanken. Mein Dank gilt weiterhin Herrn Prof.Dr. Rainer Müller für die Übernahme der Gutachtertätigkeit.

Meinen Kollegen in der Physikdidaktik an der TU Dresden, u. a. Göran Tronicke, David Obst, Jessie Best, Manuela Lipinsky, Sylvia Schmitt, Wiebke Janßen, Irena Doicescu, Antje Heine, Kerstin Gedigk und Marie Geyer möchte ich für die netten Gespräche, wertvollen Hinweise und die gute Arbeitsatmosphäre während der letzten Jahre danken.

Mein besonderer Dank gilt Wiebke Janßen für das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Schließlich möchte ich meinen Eltern für die immerwährende Unterstützung danken.

36. Erklärung zur wissenschaftlichen Arbeit

Hiermit versichere ich, Matthias Schöne, dass ich die vorliegende Arbeit unter der Betreuung von Frau Prof. Pospiech an der Technischen Universität Dresden ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Dresden, den 29. Januar 2019

Matthias Schöne

